

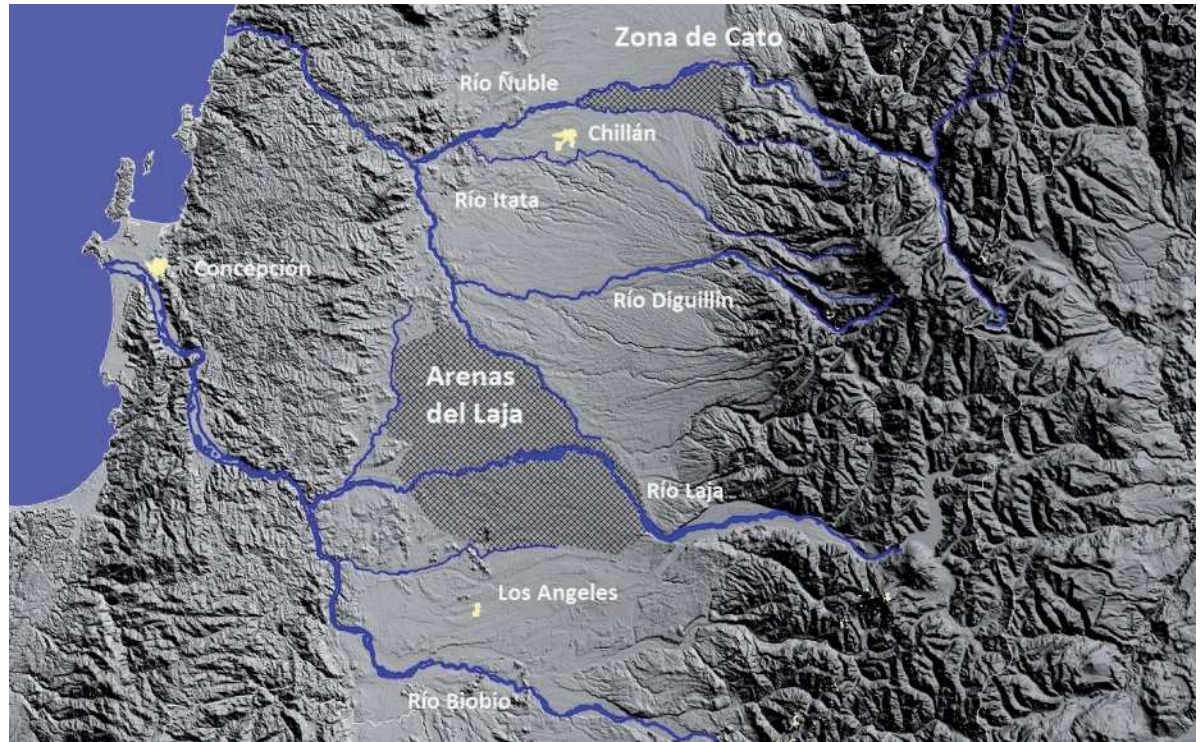
Obras y Proyectos

Revista de Ingeniería Civil

Edición 12, Primavera 2012



Obras y Proyectos



Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile

Interactions between groundwater and surface water in the Bio Bio region of Chile

J.L. Arumí, D. Rivera, E. Muñoz y M. Billib

Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas

Characterisation of the HEC-HMS model to the river Arga's watershed in Pamplona and its application to five significant floods

J.J. López, M. González, A. Scaini, M. Goñi, J. Valdenebro y F. Gimena

Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: aplicación de un modelo parsimonioso

Monthly water balance of a Patagonia Basin of Chile: application of a parsimonious model

J. Vargas, L. De la Fuente y J.L. Arumí

Parameter uncertainty methods in evaluating a lumped hydrological model

Método de incertidumbre paramétrica en la evaluación de un modelo hidrológico agregado

J. Diaz-Ramirez, R. Camacho, W. McAnally y J. Martin

Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile

Aplicación del Índice de Sustentabilidad de Cuencas en la cuenca del río Elqui, Centro-Norte de Chile

A.E. Cortés, R. Oyarzún, N. Kretschmer, H. Chaves, G. Soto, M. Soto, J. Amézaga, J. Oyarzún, T. Rötting, M. Seïoret y H. Maturana

Relación de la variación del almacenamiento de agua local y el gravímetro superconductor en el Observatorio Geodésico TIGO, Concepción, Chile

Relationship of local water storage variations and superconducting gravimeter data at the Geodetic Observatory TIGO, Concepción, Chile

G. Rossel, A. Güntner, B. Creutzfeldt, H. Wziontek, T. Klügel, P. Tume, M. Villagrán, T. Blume y H. Hase

Integración de las nuevas tecnologías en el manejo de las aguas subterráneas

Integration of new technologies to groundwater management

A. Hernández, E. Cabrera y M. Gómez



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
Departamento de Ingeniería Civil



www.oyp.ucsc.cl
oyp@ucsc.cl

www.oyp.ucsc.cl



GENERAL BONILLA, CONCEPCION



RUTA INTERPORTUARIA, CONCEPCION



CHIGUAYANTE, CONCEPCION



ACCESO NORTE A TEMUCO

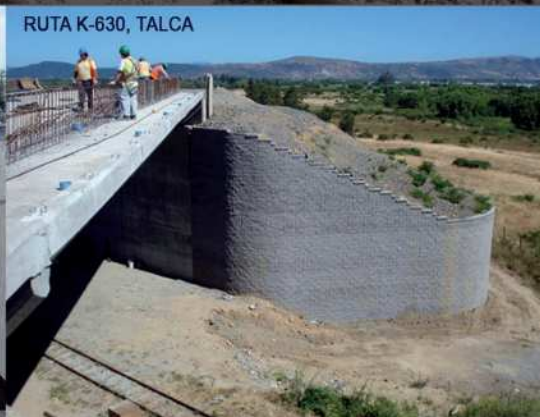


ESTRIBO SAN FRANCISCO DE MOSTAZAL, RANCAGUA

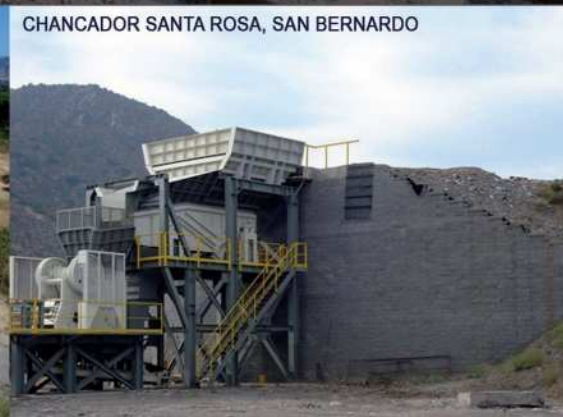
- MUY BUEN DESEMPEÑO EN TODA LA ZONA AFECTADA POR 27/F
- MURO BLOQUE SISTEMA MESA
- MURO FACHADA VEGETAL SISTEMA SIERRA



COSTANERA NORTE, SANTIAGO



RUTA K-630, TALCA



CHANCADOR SANTA ROSA, SAN BERNARDO

Edición 12, Primavera 2012
Revista Obras y Proyectos

Universidad Católica de la Santísima Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil
Alonso de Ribera 2850, Campus San Andrés, Casilla 297
Concepción, Chile

Director

Profesor Dr. Hubert Mennickent
Universidad Católica de la Santísima Concepción

Editor

Dr. Felipe Villalobos
Universidad Católica de la Santísima Concepción

Editores invitados

Dr. Diego Caamaño
Universidad Católica de la Santísima Concepción
Dr. Enrique Muñoz
Universidad Católica de la Santísima Concepción

Comité asesor

Dr. Arsenio Negro
Bureau de Projotos e Consultoria Ltda., Sao Paulo, Brasil
Dr. Giang Nguyen
The University of Sydney, Australia
Dr. Ricardo Nicolau
JRI Ingeniería, Santiago, Chile
Ing. Mauro Poblete
Universidad de Karlsruhe, Alemania
Ing. Mauricio Villagrán
Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Comité editorial

Dr. Giovanni Alvarado
AECOM Pty Ltd, Perth, Australia
Dr. Rodrigo Cienfuegos
Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile
Dra. Luisa Equihua
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México
Dr. Wagner Fleming
Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile
Dr. David Muriá
Instituto de Ingeniería, UNAM, México
Dr. Efraín Ovando
Instituto de Ingeniería, UNAM, México
Dr. Iván Salazar
Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile
Dra. Alejandra Stehr
EULA, Universidad de Concepción, Chile
Dr. Ramón Verdugo
Universidad de Chile, Santiago, Chile
Dr. Ingo Weidlich
AGFW e.V., Frankfurt/Main, Alemania
Dr. Torsten Wichtmann
Universidad de Karlsruhe, Alemania

Diseño y diagramación

VCR Publicidad
vcrpublicidad@gmail.com
888 23187

Contacto y envío de artículos

Email: oyp@ucsc.cl
Web: www.oyp.ucsc.cl

Asesoría comercial y suscripciones

Sra. Maritza Jara
maritzajara@ucsc.cl - fono: 56 41 234 53 05
\$8.000 anual (US\$30, € 20, £ 18)
Estudiantes \$5.000 (US\$ 18, € 15, £ 12)
Valor ejemplar \$4.500 (US\$ 16, € 18, £ 9)

Periodicidad: semestral (edición de Otoño y Primavera)

Revista indexada y catalogada en  www.scielo.cl

 www.latindex.org  www.dialnet.unirioja.es

Definición de la Revista

Obras y Proyectos es una revista de Ingeniería Civil cuya misión es divulgar, promover e incentivar la investigación, aportando al intercambio del conocimiento entre los profesionales del área de la Ingeniería Civil. Para ello se consideran trabajos originales de carácter científico, además de notas técnicas principalmente orientadas a exponer y discutir relevantes obras y proyectos. También se presentan trabajos técnicos que expongan innovaciones y aplicaciones utilizadas principalmente por empresas y consultoras relacionadas con la Ingeniería Civil. De esta manera se desarrollan los temas clásicos de la Ingeniería Civil, como son: Estructuras, Hidráulica, Geotecnia, Transporte y Construcción. Además otros temas relacionados y aplicados a la Ingeniería Civil son considerados, tales como Energía, Ambiente, Geología, Minería, Informática y Tecnología. De esta forma Obras y Proyectos busca la participación de un grupo amplio que abarca desde el mundo universitario, organismos públicos y el mundo empresarial.

Revisión de artículos por pares evaluadores externos

Al recibir un artículo el editor junto con miembros del comité asesor comprueban que el artículo corresponda o esté relacionado con Ingeniería Civil. Además se verifica que el artículo esté bien escrito, que no haya sido publicado anteriormente y que constituye un aporte a la Ingeniería Civil. De no ser así el artículo es devuelto. Luego, si el artículo es aceptado para su revisión, el editor envía el artículo a al menos dos especialistas en el tema que cubre el artículo. Los especialistas son evaluadores externos al Departamento de Ingeniería Civil de la UCSC y no son miembros del comité editorial. A partir de las observaciones de los evaluadores externos, el artículo puede ser aceptado, aceptado con observaciones o rechazado. En el segundo caso se pide la incorporación de cambios que satisfagan los requerimientos planteados por los revisores externos. En cualquiera de los tres casos se informa al o los autores del resultado de la revisión y de los cambios a realizar. Los autores no saben quienes revisaron sus artículos y no hay contacto entre autores y revisores. Antes de editar la revista el comité editorial la revisa en una versión en línea. Finalmente, el editor envía la versión final a imprimir para luego aprobar la prueba de impresión.

Contenidos



- 4** Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile
Interactions between groundwater and surface water in the Bío Bío region of Chile
J.L. Arumí, D. Rivera, E. Muñoz y M. Billib
- 15** Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas
Characterisation of the HEC-HMS model to the river Arga's watershed in Pamplona and its application to five significant floods
J.J. López, M. González, A. Scaini, M. Goñi, J. Valdenebro y F. Gimena
- 32** Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: aplicación de un modelo parsimonioso
Monthly water balance of a Patagonia Basin of Chile: application of a parsimonious model
J. Vargas, L. De la Fuente y J.L. Arumi
- 42** Parameter uncertainty methods in evaluating a lumped hydrological model
Método de incertidumbre paramétrica en la evaluación de un modelo hidrológico agregado
J. Diaz-Ramirez, R. Camacho, W. McAnally y J. Martin
- 57** Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile
Aplicación del Índice de Sustentabilidad de Cuencas en la cuenca del río Elqui, Centro-Norte de Chile
A.E. Cortés, R. Oyarzún, N. Kretschmer, H. Chaves, G. Soto, M. Soto, J. Amézaga, J. Oyarzún, T. Rötting, M. Señoret y H. Maturana
- 71** Relación de la variación del almacenamiento de agua local y el gravímetro superconductor en el Observatorio Geodésico TIGO, Concepción, Chile
Relationship of local water storage variations and superconducting gravimeter data at the Geodetic Observatory TIGO, Concepción, Chile
G. Rossel, A. Güntner, B. Creutzfeldt, H. Wziontek, T. Klügel, P. Tume, M. Villagrán, T. Blume y H. Hase
- 80** Integración de las nuevas tecnologías en el manejo de las aguas subterráneas
Integration of new technologies to groundwater management
A. Hernández, E. Cabrera y M. Gómez



Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile

Interactions between groundwater and surface water in the Bío Bío region of Chile

Fecha de entrega: 19 de julio 2012

Fecha de aceptación: 10 de septiembre 2012

José Luis Arumí¹, Diego Rivera¹, Enrique Muñoz² y Max Billib³

¹Centro del Agua para la Agricultura, Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Chile, jarumi@udec.cl, dirivera@udec.cl

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, emunozo@ucsc.cl

³Institute of Water Resources Management, Hydrology and Agricultural Hydraulic Engineering, Leibniz University of Hannover, Germany, billib@iww.uni-hannover.de

Los procesos geológicos que formaron el territorio de la zona central de Chile produjeron las condiciones para que existan importantes interacciones entre los sistemas de agua superficial y subterránea. Si bien estas interacciones son bastantes características en la zona Central de Chile, no son adecuadamente comprendidas por usuarios del agua, quienes aún mantienen un antiguo paradigma de considerar los sistemas superficiales como elementos separados de los sistemas subterráneos, situación que ha generado múltiples conflictos para la administración de los recursos hídricos de la zona. Con el fin de ilustrar los diferentes tipos de interacciones existentes en la zona central de Chile, este documento presenta casos de estudio realizados en la Región del Bío Bío de Chile, donde se identifica y explica este tipo de interacciones mediante análisis geológicos y aplicaciones de modelos hidrológicos. Se presentan tres casos de estudio: i) la zona alta del río Diguillín y su relación con la falta de agua en el Valle del estero Renegado, ii) la zona de Cato y su limitación productiva por altos niveles de agua subterránea, y iii) el efecto de la formación de las Arenas del Laja en el balance hídrico de los ríos de dicha cuenca. Luego de presentar estos casos de estudio se hace énfasis en que, el uso de modelos simples como la trasposición de caudales crecidas o el supuesto de igualdad de rendimiento específico, pueden generar resultados erróneos cuando existen cuencas donde las condiciones geológicas producen importantes trasvase de agua subterránea.

Palabras clave: disponibilidad de agua, cuencas Andinas, interacción aguas superficial y subterránea

The geological processes that formed the central zone of Chile produced the conditions which favour the existence of important interactions between the surface water and groundwater systems. While these interactions are characteristic features in the Central Zone of Chile, they are not adequately understood by water users, who still maintain an old paradigm of considering surface systems as separate elements from the underground systems, a situation that has led to many conflicts in the management of water resources in the area. In order to illustrate the different types of interactions in central Chile, this paper presents study cases performed in the Bío Bío Region of Chile, which identifies and explains these interactions by geological analyses and hydrological model applications. Three case studies are presented: i) the upper area of Diguillín river and its relation to the lack of water in the Renegado valley, ii) the Cato river area and its production limitation by high groundwater levels, and iii) the effect of the Arenas del Laja formation in the basin water balance. After presenting these case studies it is emphasized that the use of simple models such as the transposition of flood flows or the assumption of constant specific flows, may give erroneous results when there are basins where geological conditions cause significant diversion of groundwater.

Keywords: water availability, Andean watersheds, groundwater and surface water interaction

Introducción

En la zona central de Chile existen interacciones entre los sistemas de agua superficial y subterránea que se pueden definir por medio de los procesos geológicos que crearon los depósitos y unidades litológicas. Sin embargo, estas interacciones no son comprendidas entre los distintos usuarios del agua, quienes aún visualizan estos sistemas como elementos independientes. Por ejemplo, es común que las autoridades se refieran a la transferencia de agua desde un río a un acuífero como “pérdidas” y en el caso contrario como “recuperaciones” cuando el río recibe agua desde un acuífero (ProItata, 1992). Esto evidencia el punto de vista de tratar a las aguas superficiales como el sistema que se maneja y a las aguas subterráneas como algo aparte.

Esta desvinculación entre ambos sistemas causa problemas en la administración de los recursos hídricos porque se pierde el concepto de que las aguas subterráneas infiltran en un punto de la cuenca para luego desplazarse y aflorar en otro, siendo parte del balance hídrico de la misma. Producto de dicha visión de los sistemas superficial y subterráneo como sistemas independientes, hasta el año 2005 se otorgaban derechos de aguas subterráneas cerca de cauces superficiales. Ello generó una serie de conflictos que motivaron una de las modificaciones del Código de Aguas en el año 2005. Sin embargo, estas modificaciones no permiten enfrentar conflictos relacionados con el manejo de cauces como el que se produjo cuando se realizó una extracción de áridos en el río Chillán para la ampliación de la Ruta 5, problema que causó un descenso del nivel freático en el sector Los Colihues (cercano a Chillán) dejando a 60 familias sin agua potable (Prisma, 2004).

Este documento tiene como objetivo entregar información sobre las interacciones entre los sistemas de agua superficial y subterránea mediante la síntesis de los resultados de tres estudios previos realizados en la región del Bío Bío, Chile (Figura 1) y la explicación de ellas mediante análisis geológicos y aplicaciones de modelos hidrológicos.

Interacciones agua superficial-subterránea

Tradicionalmente los sistemas de aguas superficiales y subterráneos han sido tratados en forma independiente.

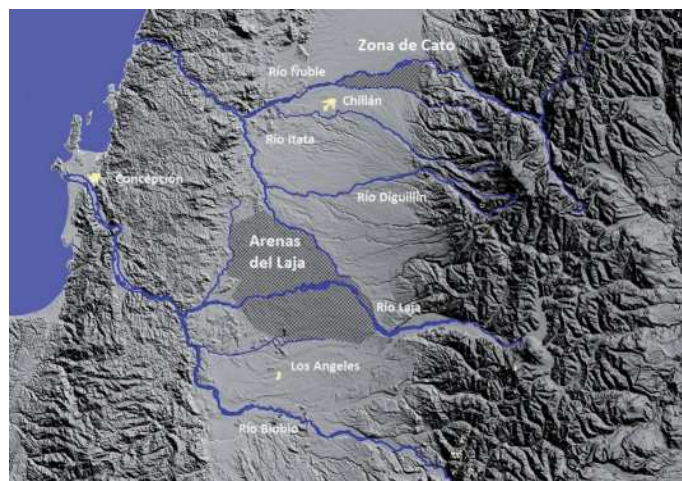


Figura 1: Ubicación en la Región del Bío Bío de los tres casos de estudio cuyos resultados se presentan en este documento: Alto Diguillín; Zona de Cato y Arenas del Laja

Por ejemplo, en los estudios de crecidas se considera que la infiltración es una pérdida de agua y en modelos de escurrimiento superficial que los sistemas de agua subterráneas son embalses lineales (Singh, 1995). Mientras que desde el punto de vista de las aguas subterráneas, la recarga se consideraba como una constante que debía ser calibrada para cumplir con el balance hídrico (Cirimo y McDonnel, 1997; Delleur, 1999; Peckenpaugh y Dugan, 1983).

A partir de la segunda mitad de la década de los noventa surgió con fuerza el concepto de que los sistemas de agua superficial y subterráneo están interconectados, y que el manejo que se haga sobre uno de ellos afecta al otro (Winter *et al.*, 1998; Woessner, 2000; Sophocleous, 2002; Fernald, 2002; Bencala, 2011). Según Sophocleous (2002), el estudio de la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas se ha orientado principalmente hacia dos grandes áreas: i) procesos de recarga y descarga de aguas subterráneas y ii) estudios de los procesos bioquímicos y geo-ecológicos que ocurren en la capa de sedimentos que se encuentra bajo los cuerpos de agua superficiales (zona hiporreica) y su efecto en la calidad del agua. Este documento se centra en el primer tema, por lo cual esto será discutido en las secciones posteriores. Con relación al segundo tema, éste es tremendamente interesante desde el punto de vista de la Ingeniería Ambiental. Se han hecho avances interesantes en relación al impacto que tiene la interacción agua superficial-subterránea en la degradación de contaminantes y por ende en la calidad de los recursos

hídricos (Cirno y McDonnell, 1997; Hinkle *et al.*, 2001, Fernald, 2002). Pruebas de trazadores han demostrado que un alto porcentaje del agua que escurre por un río ha pasado a través de la zona hiporreica, produciéndose un importante almacenamiento transitorio (Fernald, 2002; Bencala *et al.*, 2011) que genera condiciones anaeróbicas que permiten la degradación del nitrógeno (Hinkle *et al.*, 2001; Jonsson *et al.*, 2003).

Con respecto a los procesos de recarga y descarga de aguas subterráneas, estos pueden cambiar tanto temporal como espacialmente dependiendo de la zona donde se infiltra o exfiltra agua. Por ejemplo, dependiendo de la topografía, un río en verano puede recibir aportes de aguas subterráneas (exfiltraciones), pero en invierno, frente a condiciones de mayor caudal, éste puede infiltrar agua hacia el sistema subterráneo. En términos generales la relación entre un cauce y un río puede ser agrupada en tres condiciones (Bencala, 2011): i) río que pierde agua por infiltración hacia un sistema de aguas subterráneas al cual está conectado (Figura 2a), ii) río que pierde agua por infiltración hacia un sistema de aguas subterráneas al cual no está conectado debido a que la tasa de infiltración es limitada por la permeabilidad de los sedimentos existentes en el lecho del río, lo que produce condiciones de flujo no saturado entre el lecho del río y el acuífero (Figura 2b) y iii) río que recibe aguas por exfiltración desde el sistema de aguas subterráneas (Figura 2c).

Antecedentes geológicos generales de la zona central de Chile

Desde Arica hasta el Golfo de Penas, Chile se encuentra localizado en una zona de activa subducción tectónica donde la placa de Nazca se hunde bajo la placa Sudamericana, provocando que la parte Oeste del Continente Sudamericano presente una continua elevación que produce las cadenas montañosas que existen a lo largo de la costa Pacífica de Sud América. Ver antecedentes de la orogénesis de los Andes en, por ejemplo, Cembrano *et al.* (2007).

Hace aproximadamente 100 millones de años, una importante actividad tectónica creó la actual Cordillera de los Andes, forzando a los ríos que se formaron en su cara occidental a labrar valles en su movimiento al océano (Figura 3a).

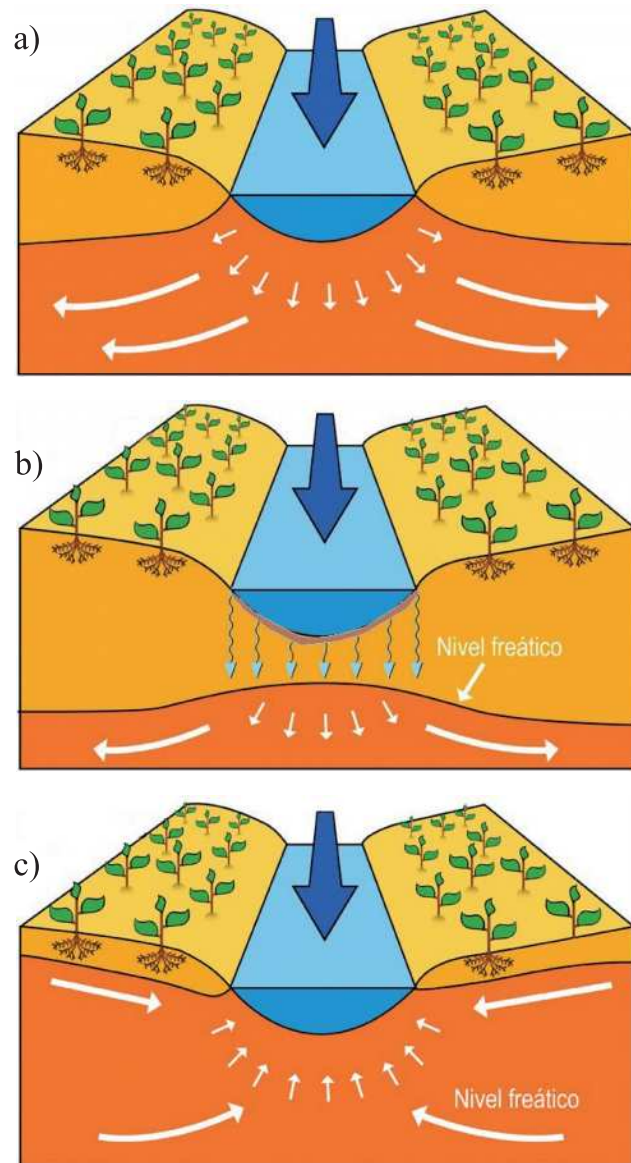


Figura 2: Conceptualización de la conexión entre un río y un acuífero: a) río que recarga a un sistema de aguas subterránea, b) río que infiltra agua a un sistema subterráneo desconectado y c) río que recibe aguas subterráneas

En la zona centro sur de Chile una continua actividad tectónica lentamente creó una depresión (Figura 3b) que fue cubierta por sedimentos formando lo que actualmente se llama depresión central. Sin embargo, debido a que los ríos ya habían labrado sus valles hacia el océano, la tendencia general de escurrimiento Este-Oeste se mantuvo (Figura 3c), generando las cuencas Andinas características de la zona centro sur de Chile, como por ejemplo, las cuencas de los ríos Itata y Bío Bío.

Esta depresión central, que localmente se llama Valle

Central, fue rellenada por depósitos que incluyen una mayor participación de materiales de origen fluvio-glacial y lúmnico, así como horizontes del suelo formados por cenizas y otros materiales procedentes del volcanismo cuaternario (Borgell, 1983). Además, ligado a la actividad volcánica se desarrollaron gruesos y extensos depósitos laháricos en forma de abanicos, así como depósitos de flujos piroclásticos (ignimbríticos) y de cenizas (Moreno y Varela, 1985). Esto provocó en los suelos, la existencia de horizontes de baja permeabilidad, y en consecuencia, la presencia de acuíferos colgados con niveles freáticos poco profundos (Arumí y Oyarzún, 2006).

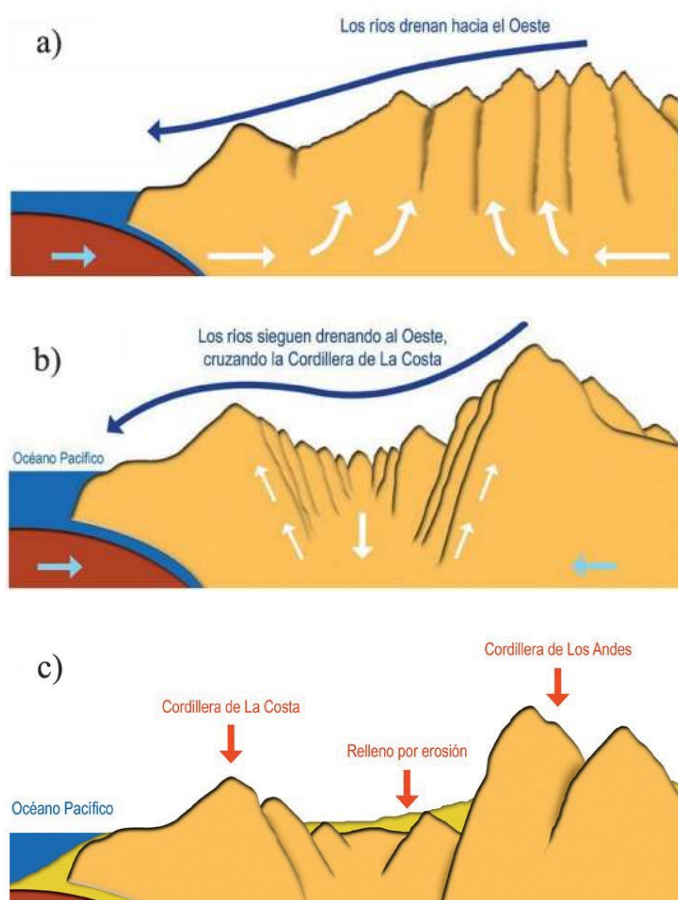


Figura 3: Evolución geológica de la zona central de Chile. a) Tectónica de subducción crea la Cordillera de los Andes, b) varios sistemas de fallas crean una depresión central que c) posteriormente fue rellenada con sedimentos.

En la zona central de Chile, la precipitación es causada por sistemas frontales provenientes del océano Pacífico, que chocan contra la Cordillera de los Andes que a su vez constituye una importante barrera orográfica que regula el clima en Sud América (Garreaud *et al.*, 2009).

Debido a esto, la Cordillera de los Andes recibe una mayor precipitación constituyendo una zona activa de recarga de aguas subterráneas, principalmente producto de los procesos de infiltración y transporte que se producen en los valles, cauces y sistemas fracturados, existentes tanto en las zonas altas como en la pre-cordillera (Carling *et al.*, 2012).

Al poniente del Valle Central, la Cordillera de la Costa actúa como una barrera geológica. Esto se puede apreciar en la Figura 4, donde se muestra como la red de drenaje superficial se concentra en el Valle del Itata, donde logra cruzar la Cordillera de la Costa. Además, se muestran las curvas equipotenciales del nivel freático del acuífero del Itata desarrolladas por DGA (2011) y que representan la misma tendencia de concentrar el flujo en el Valle del Itata.

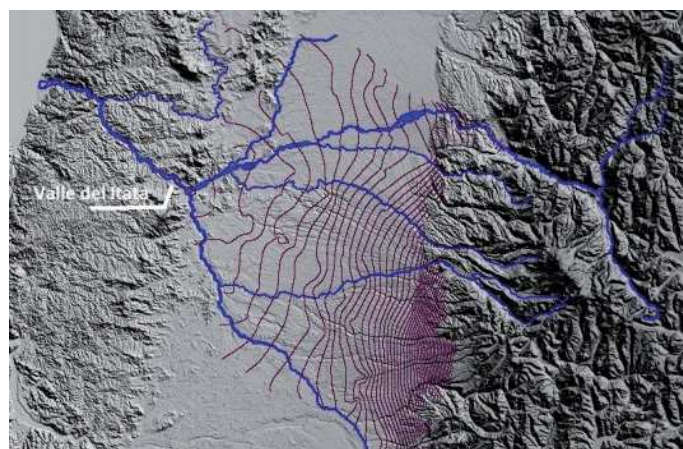


Figura 4: Modelo digital de elevación de terreno de la cuenca del Itata, donde se muestra el efecto de barrera geológica que produce la Cordillera de la Costa al concentrar los ríos y las aguas subterráneas en el Valle del Itata.

Caso 1: El agua que falta en el estero Renegado

Antecedentes de la cuenca

La cuenca del río Diguillín nace en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, en los faldeos del complejo volcánico Nevados del Chillán en la Región del Bío Bío, y es uno de los principales tributarios del río Itata. La parte superior de la cuenca está controlada por dos estaciones fluviométricas operadas por la Dirección General de Aguas: Renegado en Invernada y Diguillín en San Lorenzo (ver Figura 5), que controlan las subcuencas llamadas Renegado y Alto Diguillín respectivamente.

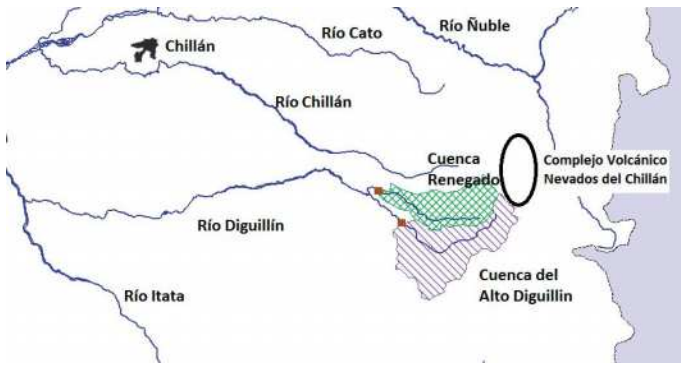


Figura 5: Ubicación de las cuencas del Diguillín y del Renegado

La geología de la parte alta de la cuenca del Diguillín es descrita en detalle por Dixon *et al.* (1999) y Naranjo *et al.* (2008), quienes explican la marcada influencia de los procesos volcánicos asociados al Complejo Termas de Chillán en dicha cuenca. Este complejo volcánico se desarrolla a lo largo de una línea de 12 km en sentido Norte-Sur y está constituida por varios tipos de estructuras creadas a lo largo de diferentes procesos que han ocurrido desde hace unos 650 mil de años (Naranjo *et al.*, 2008).

Particular importancia tiene la descripción que realizan Naranjo *et al.* (2008) sobre la formación de las unidades de lavas que rellenan el valle del río Renegado. En efecto, este valle se formó por la siguiente secuencia de flujos de lava: i) lavas los Pincheira (Pleistoceno Medio), que cortaron su paso por una gran formación glaciaria formando las paredes características que cierran el valle y abriéndose en lo que es hoy día la localidad de los Lleuques, ii) lavas Diguillín (Pleistoceno Medio), que bajaron por el valle hasta que fueron bloqueadas por las lavas Pincheira lo que las obligó a desviarse hacia el sur, cerrando el valle del Renegado y forzando su conexión con el Diguillín, iii) lavas Atacalco (Pleistoceno Medio-Superior) al igual que las anteriores rellenan el valle y se acumularon en el sector de Atacalco desviándose hacia el Diguillín, iv) lavas Lanalhue (Pleistoceno Superior) que rellenan la parte superior del valle, formando la meseta que se observa hoy en el sector de las Trancas. Los rellenos recientes del estero Renegado han terminado por formar el paisaje que se observa actualmente. La secuencia de rellenos anteriormente descrita, produjo que el valle del Renegado se desarrolle a mayor altura que el valle del Diguillín. Del análisis del modelo de elevación digital de terreno obtenido mediante los archivos SRTM (NASA, 2005), se puede generar la

curva hipsométrica para cada cuenca donde claramente se aprecia que la cuenca del Renegado se desarrolla a mayor altura que la cuenca del Alto Diguillín (Figura 6).

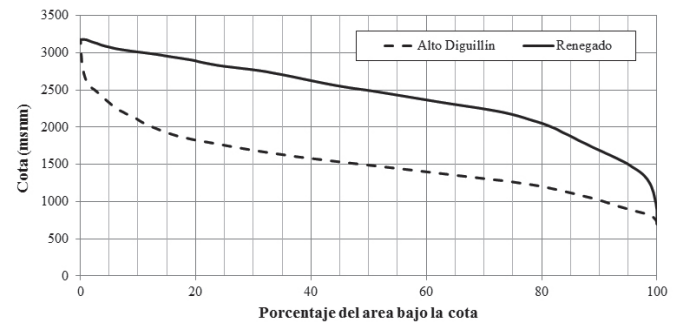


Figura 6. Curvas hipsométricas para las cuencas del Alto Diguillín y Renegado

Una marcada diferencia entre ambas cuencas se produce al comparar los caudales específicos de ambas cuencas, pues el río Renegado presenta caudales específicos menores en comparación con los del Diguillín. Con el fin de tener un tercer punto de comparación, se utilizaron los datos del río Chillán en Esperanza (localizado inmediatamente al norte del estero Renegado), encontrándose que los caudales específicos del estero Renegado son anormalmente bajos (Figura 7).

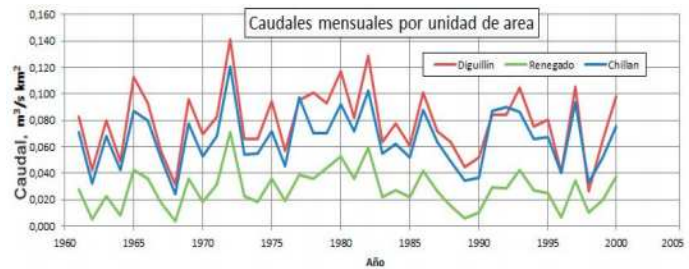


Figura 7: Comparación de los caudales específicos para los ríos Chillán, Diguillín y Renegado

Si bien es necesario considerar que la cuenca del Renegado tiene una mayor superficie sobre la cota de la línea de nieve que la cuenca del Alto Diguillín, durante el período de deshielos, el caudal específico sigue siendo menor que en el caso de Alto Diguillín, por lo que el almacenamiento y derretimiento de nieve debe descartarse para explicar esta diferencia, pues ambas cuencas pierden su cobertura nival en verano y las superficies de los glaciares existentes en el volcán Chillán es pequeña (aproximadamente 50 hectáreas). En relación a la temporada invernal, recorridos en terreno permitieron apreciar que durante los eventos

de precipitaciones, no se observa una mayor escorrentía inmediata en la cuenca del Renegado, pues los suelos son altamente permeables existiendo una alta tasa de infiltración.

Balance hídrico

Se utilizó un modelo de balance hídrico para estudiar los procesos hidrológicos de la cuenca del Diguillín. Mediante el análisis de los procesos pluviales y de derretimiento de nieve en la cuenca considerando tres componentes de almacenamiento: i) nival donde la acumulación y derretimiento de nieve se estima mediante el uso del método de grados día (Rango y Martinec, 1995), ii) suelo, donde se considera una tasa variable de infiltración que depende de la humedad del suelo y las extracciones por evapotranspiración, y iii) sistema subterráneo, que considera un almacenamiento lineal (Muñoz, 2010; Muñoz *et al.*, 2011). La implementación, calibración y validación del modelo es descrita por Zúñiga *et al.* (2012), quienes al evaluar el balance hídrico en ambas cuencas, pudieron estimar que aproximadamente el 75% del flujo base que debería escurrir en la cuenca del Renegado se infiltra y es aportado en forma subterránea a la cuenca del Diguillín, aguas abajo de la confluencia de ambos cauces.

Análisis del sistema fracturado

Durante el año 2012 se realizaron campañas de terreno para determinar cómo las aguas subterráneas provenientes del estero Renegado descargan al río Diguillín. Como resultado de estos recorridos se identificó un tramo de 6 km de largo (Figura 8) donde existen múltiples vertientes que descargan agua al río Diguillín desde rocas fracturadas (Figuras 9a y 9b). El caudal descargado por estas vertientes incrementa significativamente el caudal del río Diguillín, lo que es especialmente importante en la época de estiaje, pues asegura una mínima disponibilidad de agua para riego. Como ejemplo de lo anterior, aforos realizados en marzo de 2012, indican que el río Diguillín tenía un caudal de 3.5 m³/s en San Lorenzo (aguas arriba de las vertientes) y la descarga de estas vertientes aportaba con una cantidad similar de agua.

Al analizar estas vertientes se constató que corresponden a descargas de un sistema de rocas fracturadas asociado a la formación Diguillín. En este sentido cobra importancia

la descripción que hacen Naranjo *et al.* (2008), sobre la formación de las distintas capas de lava que rellenaron el valle del Renegado cortando paso a través de un glaciar o vaciándose sobre un lago, produciéndose un proceso llamado diaclasamiento de las rocas al enfriarse las capas y ser cubiertas por las capas de material derretido que continuaba llegando, esta fracturación puede ser claramente apreciada en las Figuras 9a y 9b.

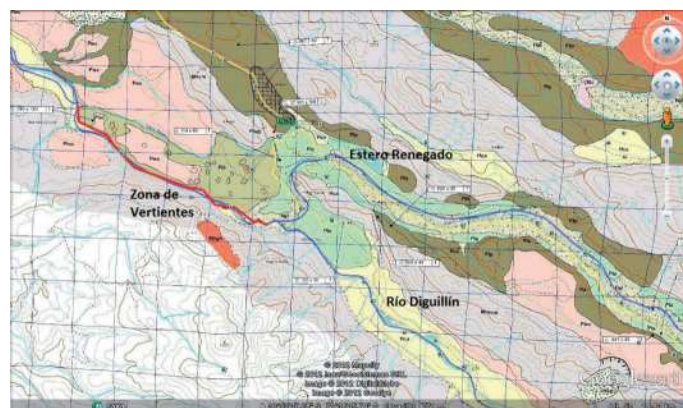


Figura 8: Sector de las Turbinas, donde se identificó una zona con vertientes que caen al río Diguillín (línea roja)



Figura 9: Vertientes que descargan al río Diguillín desde formaciones de rocas fracturadas ubicadas en el sector mostrado en la Figura 8



Los suelos existentes en el valle del Renegado son permeables (arenas volcánicas) por lo cual la lluvia que cae infiltra rápidamente, al igual que el agua que se derrite desde la nieve. Por ello una componente importante de la escorrentía de la cuenca se produce en forma subterránea no descargando al estero Renegado sino que escurriendo hacia el río Diguillín a través de un sistema de rocas fracturadas. Por lo anterior, se puede inferir que el estero Renegado es, en términos hidrológicos, un cauce que pierde agua por infiltración (Figura 2b) y que está desconectado de los depósitos de aguas subterráneas. Por eso no hay pozos norias en la zona y todas las captaciones de aguas son vertientes o se sacan directamente del río.

Caso 2: La zona de Cato

Como se mencionó, la depresión central se relleno por sucesivos depósitos de material proveniente de la Cordillera de los Andes.

En el caso de la cuenca del Itata, dos importantes depósitos son los abanicos pleistocénicos del río Ñuble (Abanico de San Carlos) y del río Chillán (Abanico de Chillán). Ambas formaciones se unen al norte de la ciudad de Chillán formando en dicha unión el río Cato, que se desarrolla a una cota mucho más baja que los ríos Ñuble y Chillán (Figura 10).

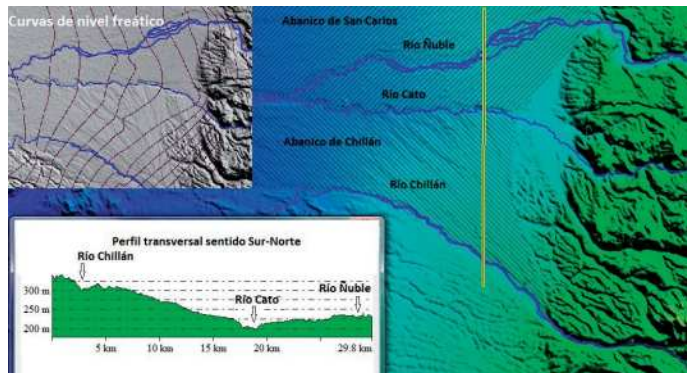


Figura 10: Antecedente de la zona de Cato. Curvas equipotenciales del nivel freático y el modelo digital de terreno donde se aprecia que el río Cato se desarrolla a una menor cota que los ríos vecinos Chillán y Ñuble

El análisis de la hidrología de esta zona permitió establecer que existe una importante interacción entre el sistema de aguas subterráneas entre los ríos Cato y Ñuble. Al ingresar

al Valle Central, el río Ñuble recarga al sistema de aguas subterráneas, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 2a, y posteriormente cambia a un río que recibe aportes de aguas subterráneas (Figura 2c). Por otro lado, el río Cato es un río que recibe las aguas subterráneas a través de los rellenos de alta permeabilidad que unen ambos ríos, y que forman un sistema acuífero que además es recargado por infiltraciones de canales de riego y excesos de riego superficial (Figura 11).

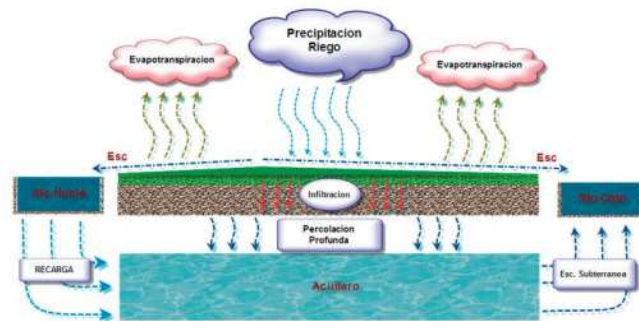


Figura 11: Esquema conceptual de las interacciones hidrológicas existentes en la zona de Cato

Caso 3: El río Laja

El río Laja es el principal afluente del río Bío Bío y nace de las filtraciones que se producen a través de la barrera de material volcánico que cierra el Lago Laja. Debido a la presencia de restos de la caldera volcánica del Dañicalqui, ubicada al Norte de dicho río, la cuenca del Laja se estrecha en el sector de Rucúe, para después abrirse formando un abanico (Figura 12).

La formación de este abanico, característico del Laja es presentada por Thiele *et al.* (1998), quienes describen las unidades geológicas existentes y los procesos que formaron dicho territorio producto de la actividad del volcán Antuco ocurrida durante el Pleistoceno superior y Holoceno temprano. Una erupción del volcán Antuco cerró el desagüe del Lago Laja provocando una barrera de 100 m de altura que al aumentar el nivel del lago colapsó generando un gigantesco aluvión que formó el abanico, que localmente se denomina “Arenas del Laja” (Figura 13). Estos depósitos tienen un espesor de aproximadamente 10 m y se encuentran sobre un antiguo lahar que es varias veces menos permeable que las arenas. Esta condición produce que las Arenas del Laja constituyan un sistema superficial de aguas subterráneas que es recargado por infiltraciones



del río Laja, los canales de riego y directamente por aguas lluvias.

Durante el verano del año 2008, se realizó un estudio que permitió estimar que la parte superior del río Laja corresponde a un río que pierde agua hacia los sistemas de aguas subterráneas y recarga el sistema de aguas subterráneas con una tasa de 4 a 10 m³/s (Arumí *et al.*, 2012).



Figura 12: Cuenca del río Laja (Arumí *et al.*, 2012)

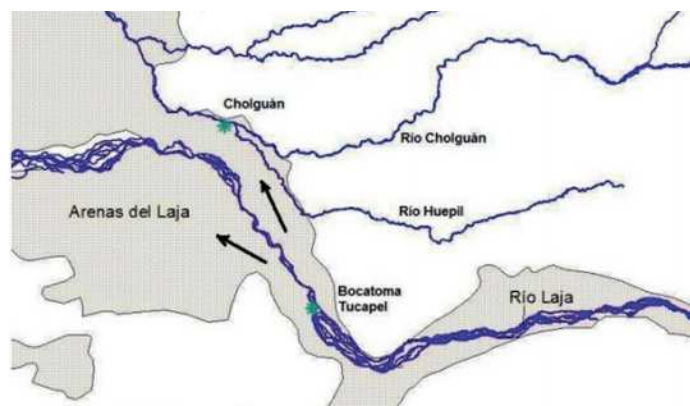


Figura 13: Esquema del flujo regional de aguas subterráneas en la zona de las Arenas del Laja (Arumí *et al.*, 2012).

El sistema acuífero formado por las Arenas del Laja es drenado por cauces ubicados al poniente de la cuenca que se desarrollan en la unión entre los depósitos de arenas y la Cordillera de la Costa como los ríos Claro y Huaqui. Por otra parte, el río Claro se desarrolla en la parte baja de la cuenca del Laja, drenando la unión entre las Arenas del Laja y la Cordillera de la Costa, escurriendo en una dirección Norte-Sur (Figura 12). Al analizar el balance hídrico de este río se encuentra que los caudales de verano son anormalmente altos. Durante la temporada de estiaje

en Chile (octubre a abril), las precipitaciones tienen poco efecto en la generación de escorrentía ya que no contribuyen a más del 15% del total anual y prácticamente es consumida por evapotranspiración. Por esa razón el régimen hídrico en estos ríos posee una pronunciada recesión, llegando en algunos casos a secarse al final de esta temporada. En cambio, el río Claro tiene un caudal de verano casi constante que es originado por el drenaje de las aguas subterráneas liberadas por las Arenas del Laja. Una situación similar ocurre con el río Huaqui, que drena directamente el límite sur de las Arenas del Laja y que posee un alto valor de caudal por unidad de área (Figura 14).

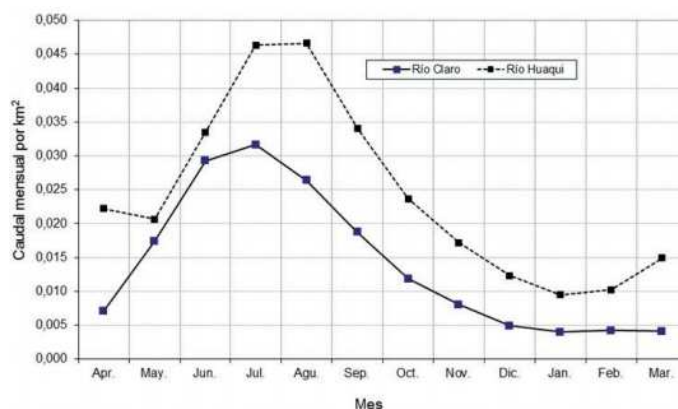


Figura 14: Comparación entre los ríos Claro y Huaqui que drenan las Arenas del Laja

Conclusiones

Como se presentó en los diferentes casos de estudio, en la zona central y precordillerana de la Región del Bío Bío, es posible identificar marcadas interacciones entre los sistemas de agua superficial y subterránea a causa de la geología existente. La tectónica produjo el alzamiento de las cordilleras y la formación de la depresión central, generando cuencas hidrográficas cuyos flujos escurren en el sentido Este-Oeste. Los cauces que drenan la depresión central, rellena por depósitos de material proveniente de las cordilleras, deben unirse para formar un curso principal que es capaz de cruzar la Cordillera de la Costa, proceso que genera marcadas zonas donde el nivel freático es superficial. Por otro lado, en la unión de las grandes formaciones de rellenos recientes con otras unidades geológicas, se forman cursos de agua que tienden a recibir el drenaje de los depósitos de aguas subterráneas, como es el caso de los ríos Cato, Claro y Huaqui. El volcanismo



produce una modificación del paisaje y de la red hidrológica como se evidencia en los procesos de formación del valle del Renegado y de las Arenas del Laja. En consecuencia, el régimen hídrico de ríos como el Diguillín, el Cato y el Claro o las causas de la existencia de altos niveles freáticos en la zona de Cato son en gran parte controlados por la existencia de estos mecanismos de interacción entre los sistemas superficiales y subterráneos.

Finalmente, es importante destacar que en la ingeniería práctica se utiliza muy frecuentemente el supuesto de similitud entre cuencas vecinas para aplicar las metodologías de suponer igualdad de rendimiento específico y/o trasposición de crecidas. Para esto es importante verificar con cuidado esta similitud hidrológica a través de un análisis de las características climáticas, geomorfológicas y tipo y uso de suelo. Pero en cuencas influenciadas por sistemas volcánicos (de las cuales hay muchas en Chile), se deberá considerar cuidadosamente la información geológica de cada cuenca antes de usar indiscriminadamente estos supuestos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección General de Aguas por facilitar la información que hizo posible este trabajo. También se agradece a Conicyt por el financiamiento dado a través de los proyectos Conicyt-BMBF 2008–099 y Fondecyt 1110298.

Referencias

- Arumí, J.L. y Oyarzún, R.A. (2006). Las Aguas Subterráneas en Chile. *Boletín Geológico y Minero (IGME)* 117(1), 37-45.
- Arumí, J.L., Rivera, D., Rougier, A. y Díaz, R. (2012). Estimación de pérdidas de agua en tramos de ríos del sistema Laja-Diguillín en la zona central de Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3, 135-141.
- Bencala, K.E. (2011). Stream–Groundwater Interactions. In: Peter Wilderer (ed.) *Treatise on Water Science* 2, 537–546, Oxford: Academic Press.
- Bencala, K.E., Gooseff, M.N. and Kimball, B.A. (2011). Rethinking hyporheic flow and transient storage to advance understanding of stream-catchment connections. *Water Resources Research* 47, W00H03.
- Borgell, R. (1983). Geografía de Chile, Tomo II: Geomorfología. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- Carling, T., Mayo, A.L., Tingey, D. and Bruthans, J. (2012). Mechanisms, timing, and rates of arid region mountain front recharge. *Journal of Hydrology* 428–429, 15-31.
- Cembrano, J., Lavenu, A., Yañez, G., Riquelme, R., García, M., González, G. and Hérail, G. (2007). Neotectonics. In *The Geology of Chile*. Moreno and Gibbons eds. The Geological Society of London
- Cirno, C.P. and McDonnell, J.J. (1997). Linking the hydrologic and biogeochemical controls of nitrogen transport in near-stream zones of temperate-forested catchments: a review. *Journal of Hydrology* 199(1-2), 88-120.
- Delleur, J.W. (1999). *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press. Boca Raton. Florida.
- DGA. (2011). Estudio hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Aquaterra Ingenieros Ltda.
- Dixon, H., Murphy, M., Sparks, S., Chávez, R., Naranjo, J., Dunkley, P., Young, S., Gilbert, J. and Pringle, M. (1999). The geology of Nevados de Chillán volcano, Chile. *Revista Geológica de Chile* 26(2), 227-253.
- Fernald, A. (2002). Groundwater/Surface Water Interactions. New Mexico Annual Water Conference Proceedings. WRRI: 46th Proceedings, 323, 49-57.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. and Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281(3), 180-195.
- Hinkle, S.R., Duff, J.H., Triska, F.J., Laenen, A., Gates, E.B., Bencala, K.E., Wentz, D.A. and Silva, S.R. (2001). Linking hyporheic flow and nitrogen cycling near the Willamette River - a large river in Oregon, USA. *Journal of Hydrology* 244(3-4), 157-180.
- Jonsson, K., Johansson, H. and Wörman A. (2003). Hyporheic exchange of reactive and conservative solutes in streams—tracer methodology and model interpretation. *Journal of Hydrology* 278(1-4), 153-171.
- Moreno, H. y Varela, J. (1985). Geología, volcanismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la Región Central y Sur de Chile. Suelos volcánicos de Chile. J. Tosso, ed., Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Chile, 491-526.



- Muñoz, E. (2010). *Desarrollo de un modelo hidrológico como herramienta de apoyo para la gestión del agua. Aplicación a la cuenca del río Laja, Chile*. Tesis Master, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, España.
- Muñoz, E., Álvarez, C., Billib, M., Arumí, J.L. and Rivera, D. (2011). Comparison of gridded and measured rainfall data for hydrological studies at basin scale. *Chilean Journal of Agricultural Research* 7(3), 459-468
- Naranjo, J.A., Gilbert, J. y Sparks, R.S. (2008). Geología del complejo volcánico Nevados de Chillán, Región del Bío Bío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 114, 28pp.
- NASA (2005). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [en línea] <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/>
- Peckenpaugh, J.M. and Dugan, J.T. (1983). Hydrogeology of parts of the Central Platte and Lower Loup Natural Resources Districts. Nebraska. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation. Report 83-4219, 100 pp.
- Prisma (2004). Plan Maestro de Manejo de Cauces Cuenca del Río Chillán, VIII Región. Santiago, Chile.
- ProItata (1992). Proyecto Itata, Estudio Hidrológico y Situación Actual Agropecuaria. Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile.
- Rango, A. and Martinec, J. (1995). Revisiting the degree-day method for snowmelt computations. *Journal of the American Water Resources Association* 31(4), 657-669.
- Singh, V.P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications.
- Sophocleous, M. (2002). Interaction between groundwater and surface water: The state of the Science. *Hydrogeology Journal* 10, 52-67.
- Thiele, R., Moreno, H., Elgueta, S., Lahsen, A., Rebolledo, S. y Petit-Breuilh, M.E. (1998). Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile* 25(2), 229-253.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. and Alley, W.M. (1998). Ground Water and Surface Water a Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver Colorado.
- Woessner, W.W. (2000). Stream and fluvial plain groundwater interactions: rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water* 38(3), 423-429
- Zúñiga, R., Muñoz, E. y Arumí, J.L. (2012). Estudio de los Procesos Hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y Proyectos* 11, 69-78



Vía Interlaguna 406 - Parque Industrial Ejército - Concepción - Chile
 Mail: liem_concepcion@liem.cl - liem.ingenieria@liem.cl - Fono: 56 41 2853888 - Fax: 56 41 2853889

INGENIERIA GEOTECNICA Y ESTRUCTURAL

- Geología e Hidrogeología
- Dinámica de Suelos
- Ensayos Geofísicos
- Ensayos Sísmicos



LABORATORIOS

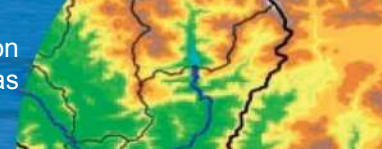
- Control de obras MINVU, SERVIU, MOP y privadas.
- Areas acreditadas: Mecánica de Suelos, Hormigón, Asfalto y Prefabricados
- Sondajes Rotatorios y de Percusión (SPT), marítimos y terrestres.

Liem Laboratorios, fue fundado en Agosto de 1991 y constituido como Laboratorio Oficial de Registro MINVU el 08 de Septiembre de 1992, actualmente se encuentra acreditado por el INN Chile y por tanto está oficialmente facultado para emitir informes de ensayos en diversas áreas.

A partir del posicionamiento del laboratorio Liem como empresa, sumado ello al prestigio en el medio, local y del Sur de Chile, se considera oportuno y necesario ofrecer los servicios de Ingeniería e Inspección, cubriendo en forma más amplia e integral las necesidades de nuestros clientes. Nace así, en 2003, **Liem Ingenierías**.

LIEM Ltda., Ingeniería y Laboratorios, gracias a su calidad técnica y profesional, y al prestigio logrado, participa actualmente en proyectos a lo largo de todo Chile.





Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas

Characterisation of the HEC-HMS model to the river Arga's watershed in Pamplona and its application to five significant floods

Fecha de entrega: 21 de febrero 2012

Fecha de aceptación: 14 de junio 2012

J. Javier López¹, Miguel González¹, Anna Scaini¹, Mikel Goñi¹, José V. Valdenebro^{1, 2} y Faustino N. Gimena¹

¹ Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía, 31006 Pamplona, Navarra, España. jjlr@unavarra.es, mikel.goni@unavarra.es, faustino@unavarra.es

² Área de Proyectos Estratégicos, Ayuntamiento de Pamplona, Plaza Consistorial s/n, 31001 Pamplona, Navarra, España, j.valdenebro@pamplona.es

Pamplona es una ciudad que es atravesada por el río Arga a lo largo de una llanura aluvial, que es susceptible de inundaciones cuando se producen avenidas de cierta magnitud. Ante esta situación es importante contar con un modelo hidrológico que permita simular los caudales del río que atraviesa el núcleo urbano, a partir de los datos de los distintos pluviómetros existentes en la cuenca, y que sirva para alimentar a modelos hidráulicos que permitan definir las zonas inundables asociadas a distintos niveles de probabilidad. Con esta finalidad, se ha montado y caracterizado el modelo HEC-HMS de la cuenca del río Arga en Pamplona, y posteriormente, se ha aplicado a las cinco avenidas más significativas de los últimos años, de las que se disponen de los mínimos datos de caudal y precipitación necesarios. HEC-HMS es un modelo lluvia-escorrentía que se basa en estructurar la cuenca origen en subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial. El flujo base en los hidrogramas observados se ha estimado mediante el filtro de Eckhardt. Después de realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros inciertos del modelo, en el que se ha observado que el más sensible es el CN, se ha aplicado el modelo con los datos de las series de precipitación de las estaciones automáticas, y con los datos de las automáticas más las manuales, en este segundo caso los resultados han mejorado significativamente obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras clave: HEC-HMS, simulación de avenidas, modelos lluvia-escorrentía

Pamplona is a city that is crossed by the river Arga along a floodplain, which is susceptible to flooding when there are floods of certain magnitude. In this situation it is important to have a hydrological model able to simulate the flows that runs through the city centre, from the data of different gauges in the watershed, which serve to feed hydraulic models that permits to define the flooding susceptible areas associated to different levels of probability. With this end, the HEC-HMS model of river Arga's watershed in Pamplona, has been assembled and characterised, and subsequently applied to the five most significant floods in recent years, from which the minimum required data of flow and precipitation is available. HEC-HMS is a rainfall-runoff model that consists of structuring the source watershed into sub-watersheds associated to the river network. The base flow in the observed hydrographs was estimated by the Eckhardt filter. After performing a sensitivity analysis of uncertain parameters of the model (in which it has been observed that CN is the most sensitive) the model has been applied with data from the precipitation series of the automatic stations and data from automatic plus manual stations; in the latter case the results have improved significantly, obtaining satisfactory results.

Keywords: HEC-HMS, flood simulation, rainfall-runoff models



Introducción

Los ríos Arga y Ulzama que nacen en la zona montañosa al norte de Navarra, España, se caracterizan por ser ríos de montaña que discurren por valles estrechos y con pendientes acusadas. Al llegar a la Cuenca de Pamplona, donde se ubican diversas poblaciones en torno a la capital Navarra (Pamplona), ambos ríos se unen duplicando su caudal, reducen considerablemente su pendiente adoptando una forma meandriforme, y atraviesan extensas plataformas inundables ocupadas por desarrollos urbanísticos con usos residenciales, dotacionales e industriales (Figura 1). Estas zonas en momentos de riadas o avenidas son susceptibles de ser anegadas (Figura 2), como se demuestra en una revisión de hemeroteca llevada a cabo por Iglesias (2008), en la que se pone de manifiesto que en las últimas tres décadas se han contabilizado más de una treintena de fenómenos tormentosos que han producido daños o problemas asociados a inundaciones en la cuenca de Pamplona. Por otra parte, las avenidas más importantes de los últimos 15 años se han producido en febrero de 2003, marzo de 2006 y febrero de 2009, cuyos valores de los periodos de retorno, estimados por el Gobierno de Navarra, se cifran en 10, 5 y entre 10 y 15 años respectivamente, lo que resulta coherente con los resultados de la revisión citada. Aunque el río Arga es el río más caudaloso que atraviesa Pamplona, no es el único que lo hace y que tiene afecciones sobre la ciudad, por el sur el río Elorz y su afluente el Sadar cruzan a través de algunas poblaciones y barrios de Pamplona (Figura 1), uniéndose al río Arga poco después de haberla atravesado.



Figura 1: Ortofoto de la cuenca de Pamplona con la red hidrográfica marcada (SITNA)



Figura 2: Fotos de las inundaciones del 12 de febrero de 2009 en Pamplona

Podemos decir que Pamplona, con unos 200.000 habitantes, se asienta fundamentalmente sobre dos ámbitos: uno la Meseta, muy elevada con respecto al nivel del río; y otro el aluvial del río en el que existen riesgos de inundación fundamentalmente en las zonas más próximas al río. El Ayuntamiento de Pamplona a través de los Planes de Ordenación Urbanísticos ha ido buscando devolver al río el terreno que le pertenece. De esta forma, en el Plan General de 1984, Pamplona se plantea la recuperación de este hábitat natural como un objetivo prioritario, integrando el entorno fluvial del río Arga en la ciudad como un gran Parque Fluvial, no solo como un espacio público de ocio



sino como motor de un urbanismo racional y sostenible.

Posteriormente, en el Plan Municipal aprobado en el 2002 (Ayuntamiento de Pamplona, 2003) no solamente se engloba este entorno fluvial sino que lo completa con la integración de los parques fluviales de los ríos Elorz y Sadar (Figura 1). Los objetivos de esta planificación se han podido satisfacer gracias a la implementación de un Plan Integral de actuación en los Ríos de Pamplona, cofinanciado por Europa al 80%, que se ha acometido en tres fases y en estos momentos se encuentra en la tercera.

Todo este esfuerzo de planificación y actuación se ha traducido en una minimización de los daños asociados a inundaciones, ya que, a pesar de la frecuencia de avenidas y de la gran extensión de suelo urbano susceptible, en la mayor parte de estas situaciones lo que se ve afectado en general son parques y, con menor frecuencia para las de mayor magnitud, algún aparcamiento y algunas viviendas y dotaciones deportivas próximas al río.

A partir del 2007, con la aprobación de la Directiva 2007/60/CE (CEE, 2007) relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, se establece en Europa un marco legislativo para la reducción de los daños causados por inundaciones, ya sea a personas, al medio ambiente, al patrimonio cultural, o a la actividad económica. Esta directiva obliga a las Administraciones de los Estados miembros a: realizar una evaluación preliminar del riesgo; preparar mapas de peligrosidad y de riesgo; y diseñar planes de gestión del riesgo de inundación. En España su transposición se ha realizado mediante Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de Evaluación y Gestión de Riesgos de Inundación.

Ante estas exigencias, y como paso previo a la simulación hidráulica que permita estimar las manchas o zonas inundables, es importante poner a punto una herramienta que permita determinar los caudales que circularían por los distintos tramos de ríos que atraviesan el núcleo urbano ante diferentes hipótesis de diseño o distintos escenarios de cambio global. Esta herramienta es un modelo hidrológico Lluvia-Escorrentía que, a partir de los datos de los distintos pluviómetros con influencia en una cuenca, es capaz de determinar los caudales que circulan por los distintos tramos de río. En este caso el modelo seleccionado ha sido el HEC-HMS, un modelo de libre acceso y disponibilidad

cuya aplicación está muy extendida en el ejercicio profesional. Entre otras aplicaciones, HEC-HMS se ha utilizado para evaluar los efectos en los hidrogramas de posibles cambios climáticos, de cambios de uso del terreno, de incendios (Cunderlik y Simonovic, 2004; Kang y Ramírez, 2007; McColl y Aggett, 2007; Yusop *et al.*, 2007; Cydzik y Hogue, 2009; McLin *et al.*, 2001); para el diseño y gestión de estructuras hidráulicas (Emerson *et al.*, 2005); para la estimación de recursos hídricos, en su forma continua (Al-Abed *et al.*, 2005; Chu y Steinman, 2009); y para delimitación de zonas inundables (Treviño y Ortiz, 2004; Knebla *et al.*, 2005).

El objetivo del presente trabajo es discutir el uso del modelo HEC-HMS para la estimación de los caudales del río Arga, asociados a distintos periodos de retorno, a su paso por Pamplona.

El modelo desarrollado en HEC-HMS permitirá evaluar el efecto de posibles cambios globales (cambio climático, cambios de uso, entre otros) en la magnitud de las avenidas del mismo.

Además de esta sección introductoria, el trabajo se estructura con un apartado de Materiales y métodos, otro para Resultados y discusión, y el de Conclusiones. En la sección de Materiales y métodos se describen: la cuenca objeto de estudio; el modelo HEC-HMS; y los eventos y el método de extracción del flujo base. En el de Resultados y discusión se presenta, en primer lugar, un epígrafe dedicado a la implementación del modelo en donde se especifican los valores de los parámetros asignados en este caso concreto; en segundo lugar se presenta un análisis de sensibilidad de los parámetros más significativos del modelo; y, por último, el análisis de los resultados de la aplicación del modelo a los eventos seleccionados. Finalmente se exponen las conclusiones del trabajo.

Materiales y métodos

Se han seleccionado cinco episodios de avenida, los más importantes en magnitud y en efectos, que se han producido en el periodo en el que se disponen datos de precipitación de diez minutos en las Estaciones Meteorológicas Automáticas EMA, periodo relativamente corto comprendido desde el año 2000 hasta la actualidad. Para paliar la escasez de EMAs en la zona montañosa de

cabecera, se ha evaluado la incorporación de los datos diarios de precipitación de las Estaciones Meteorológicas Manuales EMM, con mucha mayor presencia en esa zona, a los que se ha aplicado la distribución temporal de las estaciones automáticas.

Para ello, se ha contado con los registros de diez minutos de caudal de la estación de aforo de Arazuri perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro CHE. Así mismo, se ha dispuesto de los registros de precipitación diaria y cada 10 minutos, de las estaciones manuales EMM y automáticas EMA respectivamente, repartidas por toda la superficie de la cuenca. Por otra parte, se han estimado los parámetros de los componentes del modelo HEC-HMS para la cuenca de Arga y para cada uno de los eventos.

Descripción de la cuenca

Navarra, con una superficie aproximada de 10.391 km², se sitúa al norte de España y al suroeste de la cordillera pirenaica (Figura 3). Su capital, Pamplona, localizada más o menos en el centro de Navarra, está rodeada de distintas cadenas montañosas formando lo que se denomina la Cuenca de Pamplona. Aunque de vertiente mediterránea, la cercanía a las divisorias atlánticas y la relativamente escasa altitud de las mismas, proporciona a toda la zona una situación de transición climática y biogeográfica muy fuerte.

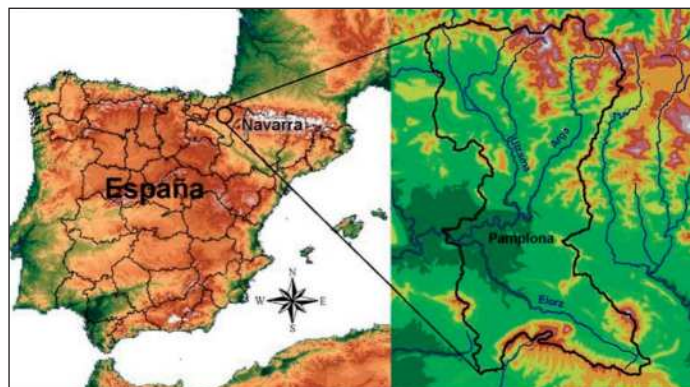


Figura 3: Localización y delimitación de la cuenca del Arga una vez atravesado Pamplona

Como se puede ver en la Figura 3, el río Arga nace en los montes de Quinto Real, en la vertiente meridional al norte de Navarra (España). Poco después toma dirección sur, a través del Valle de Esteribar, hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona, en donde recibe al río Ulzama en el municipio de Huarte, afluente de gran importancia que

duplica el caudal del Arga. En Huarte, el río Arga presenta un caudal medio anual de 7.18 m³/s y justo a la entrada de la cuenca recibe al citado río Ulzama, que procede de los montes de Ulzama-Velate y que, con su caudal medio anual de 8.48 m³/s, hace que se duplique el caudal original del río Arga.

Ambos ríos, hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona, se caracterizan por ser ríos de montaña, con pendientes acusadas que discurren por valles estrechos. Al entrar en la cuenca, el río Arga adquiere un recorrido meandriforme, recibiendo al río Elorz antes de dejar Pamplona y llegar al punto en el que se ubica la estación de aforo de Arazuri, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro. La superficie de la cuenca que drena en este punto, estación de aforo de Arazuri, es de 803.49 km² y la red fluvial queda definida fundamentalmente por los ríos Arga, Ulzama y Elorz.

En Pamplona la vega presenta una anchura de 500 a 1500 m y su régimen hidrológico manifiesta crecidas de gran magnitud, que pueden afectar a una amplia extensión de terreno.

Como consecuencia de todas estas características, el Arga debería considerarse como un río de gran dinamismo, con fenómenos de erosión en la cara externa de los meandros y ripas, sedimentación y formación de depósitos en la cara interna de los mismos, así como tendencia natural a cambiar el trazado en la llanura aluvial. Este dinamismo natural se encuentra muy alterado y casi totalmente eliminado por la presencia de numerosas infraestructuras, construcciones y aprovechamientos por lo que se puede considerar que su curso está fijado.

A nivel geológico, la cabecera de la cuenca del río Arga se asienta en los terrenos Paleozoicos, aguas abajo aparecen substratos de caliza dura y fliish. La parte media de la cuenca está formada por margas, además de arcillas y areniscas. La cuenca del río Ulzama también nace en el macizo Paleozoico, con composición muy variada en su parte alta. Aguas abajo, entra en terrenos Eocénicos de fliish intercalados con calizas arcillosas, que en su tramo final enlazan con las margas. El río Elorz queda inmerso en las margas Eocénicas que ocupan el fondo de la cuenca, entre las areniscas de la Sierra de Tajonar y los niveles calizos de la Sierra de Aláiz (Figura 4a). En cuanto a la vegetación presente en la cuenca, tal como se muestra en

la Figura 4b, al norte de la cuenca del Arga, en las zonas altas, predominan los hayedos. Aguas abajo, la cuenca queda colonizada por el bosque de roble pubescente con pino albar, siempre acompañado por el boj como especie más abundante. En la llanura de inundación aparecen los terrenos de cultivo. La cuenca del Ulzama, en su cabecera, es de características similares a la del Arga, aguas abajo aparecen amplias praderas en el fondo del valle aprovechadas por una rica cabaña ganadera. La cuenca del río Elorz se compone fundamentalmente de cultivos herbáceos y cereales, además de repoblación de pino de Austria. En las sierras aparecen hayedos en las partes altas, colonizados por robledales con el boj como especie acompañante.

El clima se puede clasificar, según el método de Papadakis, como “Meth: Mediterráneo templado” (<http://meteo.navarra.es/win/papadakis.cfm>), cuya fórmula climática es AvMME (Av: invierno Avena; M: verano Maíz; ME: Mediterráneo húmedo). La temperatura media anual varía entre 10°C en las zonas montañosas del norte de la cuenca y los 12.5°C en la zona más baja de la cuenca, Pamplona, con unas temperaturas más altas en los meses de julio y agosto y menores de diciembre a febrero. La evapotranspiración potencial ETP media, estimada por Thornthwaite, no alcanza valores superiores a 700 mm/año, siendo inferior a 650 en algunas zonas de las cabeceras y próximo a los 680 en Pamplona. El régimen de precipitaciones es estacional, siendo las estaciones con mayor pluviometría otoño y primavera, y julio y agosto los meses con el mínimo pluviométrico. La precipitación media de la cuenca del río Arga para el periodo 1940-2000 es 972 mm/año, variando entre unos 1600 mm/año en zonas altas de la cuenca y unos 750 mm/año en Pamplona. El régimen de aportaciones también es estacional y variable, la aportación media de toda la cuenca del río Arga es de 1559 Hm³/año, siendo el año de mayor aportación 1914/15 con casi 3000 Hm³ y el de menor el 2000/2001 con 511 Hm³. Las aportaciones medias anuales de las tres subcuencas que drenan a Pamplona son: Alto Arga hasta el Ulzama 188 Hm³, Ulzama 219 Hm³ y Elorz 70 Hm³.

Descripción del modelo hidrológico HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-*

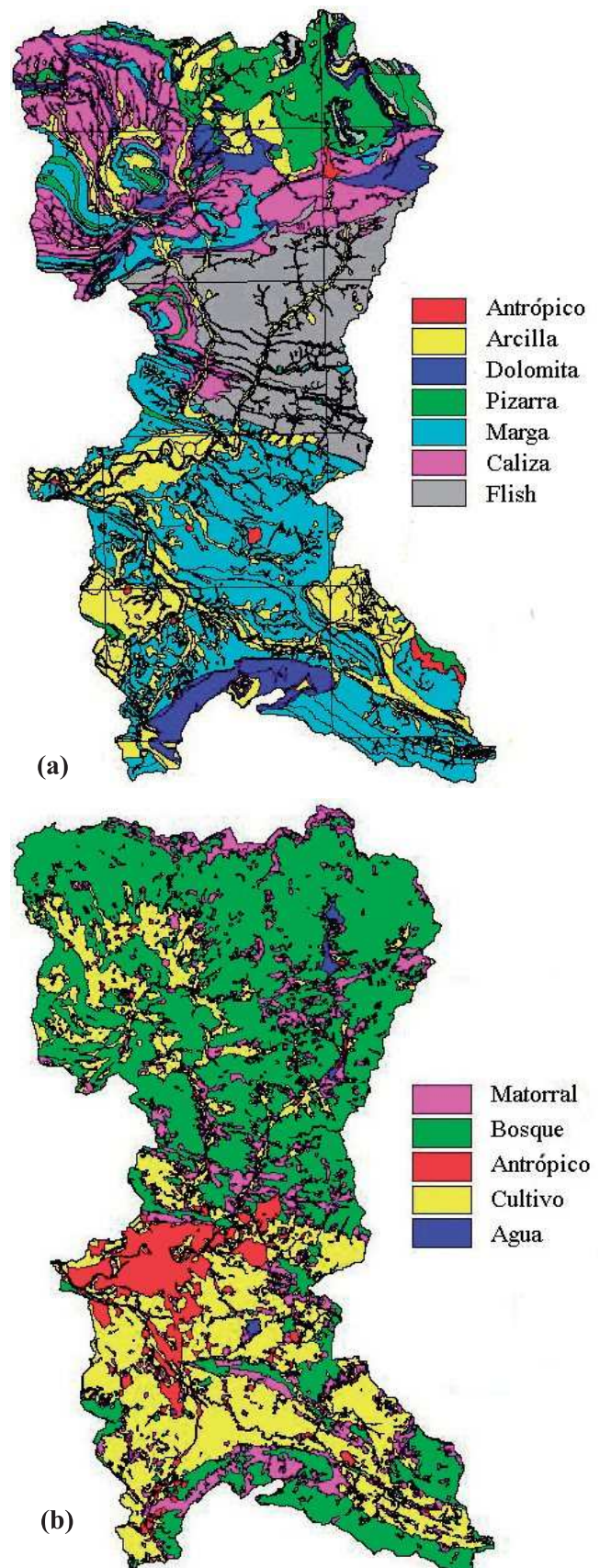
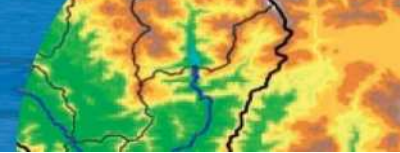


Figura 4: a) Mapa Geológico y b) mapa de usos de la cuenca del río Arga hasta la estación de aforo de Arazuri



Hydrologic Modeling System) es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* HEC del U.S. *Army Corps of Engineers* USACE, que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un episodio de lluvia. El antecedente de este modelo, el HEC-1, nació como un modelo de eventos y ha sido considerado por muchos como el modelo más versátil (Bedient y Huber, 1992) y probablemente el más ampliamente utilizado en este tipo de caracterizaciones hidrológicas de avenidas. En este trabajo se ha utilizado el HEC-HMS 3.5.

La simulación de la red de drenaje de una cuenca constituye la base del modelo. Todas las demás opciones están desarrolladas sobre la capacidad de cálculo de hidrogramas en cualquier punto de la cuenca (Viessman y Lewis, 1996). Los componentes del modelo funcionan basados en relaciones matemáticas simples que tratan de representar los procesos que intervienen en la generación y circulación de los hidrogramas de escorrentía, por ejemplo, pérdidas, transformación del exceso de lluvia en caudal de salida de la cuenca, adición del flujo base y circulación del hidrograma por el cauce. El punto de partida, por lo tanto, es la representación distribuida de la cuenca basada en una red ramificada de sistemas hidrológicos-hidráulicos (subcuencas-embalses) conectados por sistemas hidráulicos (cauces).

Cada sistema se caracteriza fundamentalmente por dos elementos: una serie de parámetros que especifiquen las características particulares del mismo, y unas relaciones matemáticas que rigen su comportamiento.

La entrada al modelo es la precipitación evaluada para cada subcuenca, que se hace mediante el método de los Polígonos de Thiessen (Chow *et al.*, 1989), a partir de los registros de precipitación de las estaciones pluviométricas con influencia en cada subcuenca. Por lo tanto, los valores de precipitación del hidrograma en cada subcuenca, P_{sb} , y para cada intervalo de tiempo, i , que se suponen uniformes en toda la superficie de cada subcuenca, se determinan como una media ponderada de las precipitaciones, P_{em} , de las distintas estaciones meteorológicas, j , con influencia en la subcuenca, según la ecuación (1):

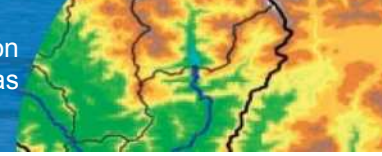
$$P_{sb}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{em}(i, j) w(j)}{\sum_{j=1}^n w(j)} \quad (1)$$

Donde $P_{sb}(i)$ es la precipitación media uniforme sobre una subcuenca en el intervalo i , $P_{em}(i, j)$ es la precipitación registrada en el intervalo i y estación j , $w(j)$ es el área de influencia de la estación j en la subcuenca, n es el número de estaciones meteorológicas con influencia en la subcuenca.

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación total que se transforma en escorrentía directa, el resto de la precipitación es considerada como pérdidas o abstracciones.

Para el cálculo de estas pérdidas, HEC-HMS cuenta con diferentes métodos. En este caso, se ha elegido el método del Servicio de Conservación de Suelos SCS, o también llamado del número de curva CN , por contar con una información del uso y tipo de suelo digitalizada de calidad. Este método fue desarrollado por el SCS del Departamento de Agricultura de los EE.UU., USDA, para estimar las pérdidas (o abstracciones) en un evento de lluvia o aguacero (Mockus, 1969), y hoy en día es uno de los más utilizados en el ámbito profesional. En este método la altura de lluvia efectiva es función del volumen de precipitación total y de un parámetro de pérdidas denominado número de curva CN . El número de curva varía en el rango de 0 a 100 y depende de factores que influyen en la generación de escorrentía en la cuenca: tipo hidrológico del suelo (Grupo hidrológico-Capacidad de drenaje); uso y manejo del terreno; condición superficial del suelo; y condición de humedad antecedente.

Esta metodología establece que la escorrentía superficial directa comienza después de que se alcance un cierto valor de lluvia acumulada, I_a , denominada pérdida (o abstracción) inicial. En base a datos de numerosas cuencas pequeñas experimentales instaladas a lo largo de los EE.UU., se llegó a la expresión $I_a = 0.2S$, donde el coeficiente 0.2 es el valor de un parámetro de ajuste, recomendado por el SCS como estándar del coeficiente de pérdidas iniciales en base a ese gran número de datos experimentales. Los estudios realizados por el SCS permitieron relacionar la retención



máxima potencial, S , con un parámetro de referencia empírico y adimensional que se denomina número de curva, CN , cuya expresión en mm es:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2)$$

Circulación de la lluvia efectiva a través de la cuenca

Este proceso hace referencia a la generación del hidrograma en el punto de drenaje de una cuenca como consecuencia de la circulación de la lluvia efectiva a través de toda la superficie de la cuenca, componente que representa la escorrentía superficial directa. HEC-HMS, al igual que para los demás componentes del modelo, dispone de diferentes métodos para determinar este hidrograma de escorrentía directa. En este trabajo se ha seleccionado la técnica del hidrograma unitario HU y, dentro de ésta, se ha elegido el HU Adimensional del SCS por ser un método sencillo ampliamente aplicado en multitud de casos. Este HU se desarrolló en el SCS, en la década de los 50, también en base a observaciones de numerosas cuencas agrícolas repartidas a lo largo de toda la geografía de los EE.UU. Las variables están adimensionalizadas, haciendo el mismo de ámbito universal, de forma que el caudal se representa como q/Q_p , siendo Q_p el caudal máximo o punta generado en la cuenca objeto de estudio; y el tiempo como t/T_p , donde T_p es el tiempo para el caudal máximo. Esta metodología establece que (Chow *et al.*, 1989):

$$Q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad (3)$$

Donde Q_p es el caudal punta en m^3/s por cm de lluvia efectiva; A es la superficie de la cuenca en km^2 ; y T_p es el tiempo al máximo en horas, cuyo valor es,

$$T_p = \frac{T_y}{2} + T_l \quad (4)$$

Siendo T_y la duración del pulso de lluvia y T_l el tiempo de desfase de la cuenca, definido como el tiempo comprendido entre el centro de gravedad del pulso de lluvia y el instante del caudal máximo, que se determina mediante la expresión (5) (Ponce, 1989),

$$T_l = \frac{L^{0.8} (2.540 - 22,86 CN)^{0.7}}{14.104 CN^{0.7} I^{0.5}} \quad (5)$$

En la que T_l viene dado en horas, L es la longitud hidráulica en m (longitud medida a lo largo del cauce principal hasta la divisoria de la cuenca), I es la pendiente media de la cuenca en m/m, y CN es el valor del número de curva medio de la cuenca.

Circulación de los hidrogramas a lo largo de los cauces

La circulación de avenidas o hidrogramas hace referencia a como se propagan las avenidas a través de la red de cauces. De los diferentes métodos que HEC-HMS tiene implementados para circular los hidrogramas generados en las subcuencas a través de los cauces se ha elegido el método de Muskingum. Ésta es la técnica hidrológica más difundida para manejar relaciones variables de descargas-almacenamientos (Chow *et al.*, 1989). Este método modela el almacenamiento volumétrico de los hidrogramas a lo largo de los cauces de los ríos mediante la combinación de dos almacenamientos conceptuales: uno en forma de cuña y otro en forma de prisma. La ecuación fundamental de este método es:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (6)$$

donde I_j es caudal entrante en un tramo en el instante j ; Q_j es caudal saliente del mismo tramo en el instante j ; y C_1 , C_2 y C_3 son constantes que dependen de los parámetros k y x , que representan un tiempo de circulación o de tránsito, con dimensiones de tiempo, y un coeficiente de almacenamiento adimensional, respectivamente. El valor de x depende de la forma del almacenamiento en cuña modelado, así el valor de x oscila entre 0, para un almacenamiento sin cuña (embalse), y 0.5 para el caso de que exista una cuña perfectamente definida. El modelo es poco sensible al valor de x y normalmente para corrientes naturales se asume un valor medio próximo a 0.2 (Chow *et al.*, 1989). El tiempo de tránsito o circulación del hidrograma de avenida es k en cada uno de los tramos de cauces de ríos existentes en el modelo.

Las hipótesis de partida o condicionantes de los que se

parte son las siguientes: la simulación se limita a eventos de lluvia (modelo de eventos) como consecuencia de la propia aplicación del modelo a la simulación de avenidas; la modelación parte de la base de simular únicamente la escorrentía superficial directa, el flujo base se estima de forma previa a la aplicación del modelo; y no se tiene en cuenta la nieve, partimos de eventos en los que no hay nieve.

Implementación del modelo HEC-HMS

Modelo estructural

La estructura fisiográfica de la cuenca basada en la red fluvial es el punto de partida de este modelo hidrológico. Para ello hay que establecer, por una parte, las superficies generadoras de hidrogramas de escorrentía (sistemas hidrológicos o subcuencas), y, por otra, las unidades o sistemas hidráulicos por los que circulan dichos hidrogramas (cauces, embalses, etc.).

La información de partida para determinar este modelo estructurado de subcuencas y canales ha sido la red fluvial del mapa cartográfico de Navarra 1:25.000 y el Modelo de Elevación Digital MED (25x25) del Gobierno de Navarra. Se ha trabajado con el Sistema de Información Geográfico SIG *ArcView 3.2* de ESRI. A partir de la información tratada y generada en *ArcView 3.2* se ha utilizado *HEC-GeoHMS 1.1*, para volcar dicha información al HEC-HMS y construir el modelo conceptual de subcuencas y canales. El proceso seguido es el siguiente:

1.- Determinar el contorno de la cuenca objeto de estudio a partir del MED mencionado y considerando el punto definido por la estación de aforo de Arazuri como punto de drenaje de la red fluvial de la cuenca.

2.- Delimitación de las subcuencas atendiendo a distintos criterios:

2.a. Se parte de las subcuencas generadas por la red de afluentes principales: Arga, Ulzama y Elorz.

2.b. Cada una de estas subcuencas se subdivide a su vez en otras de superficie similar, dividiendo los tramos de cauce en tramos de longitud parecida.

2.c. El embalse de Eugui, como tiene una estación de aforo a la salida, se ha considerado como una subcuenca que aporta el hidrograma registrado en la estación de aforo.

2.d. La cuenca vertiente a la balsa de Ezkoriz, al ser muy pequeña y no tener desagüe, se considera como un pozo.

De esta forma se llega a la estructura de subcuencas, mostrada en la Figura 5a, que en HEC-HMS genera el modelo conceptual que se presenta en la Figura 5b (izquierda) con la terminología que también se muestra en la misma figura (derecha).

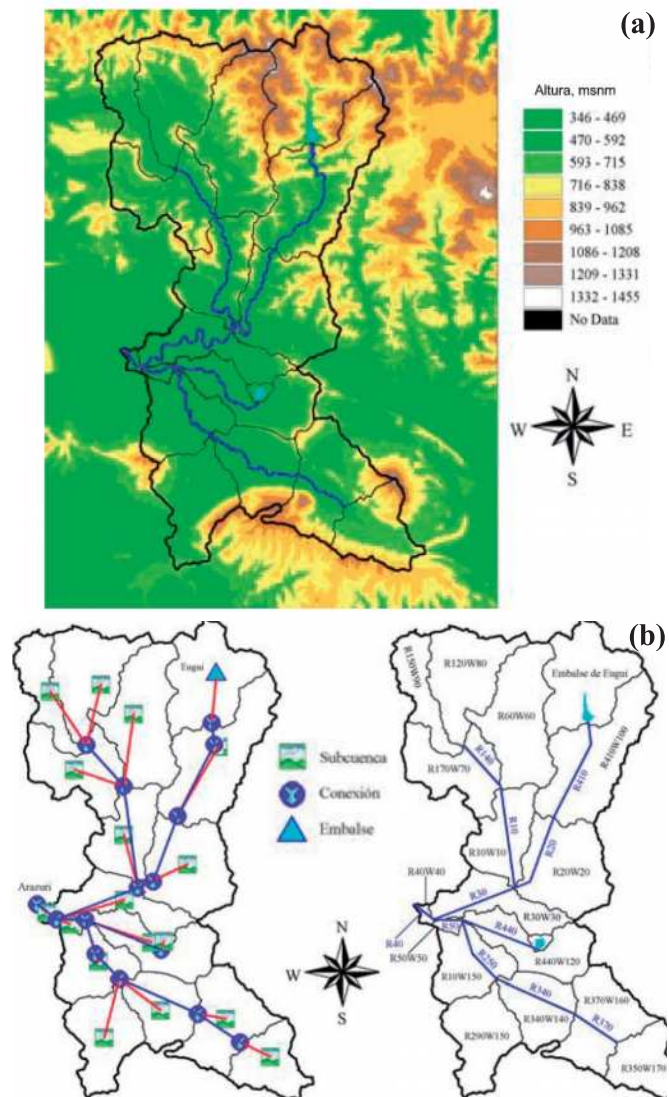


Figura 5: Representación de la cuenca del Arga en Arazuri, con a) la red fluvial y dividida en subcuencas, y b) el modelo conceptual HEC-HMS con los sistemas hidrológicos (subcuencas) e hidráulicos (cauces).

Precipitación espacial

La entrada al sistema como ya se ha explicado es la precipitación, cuyo valor espacial en cada subcuenca se

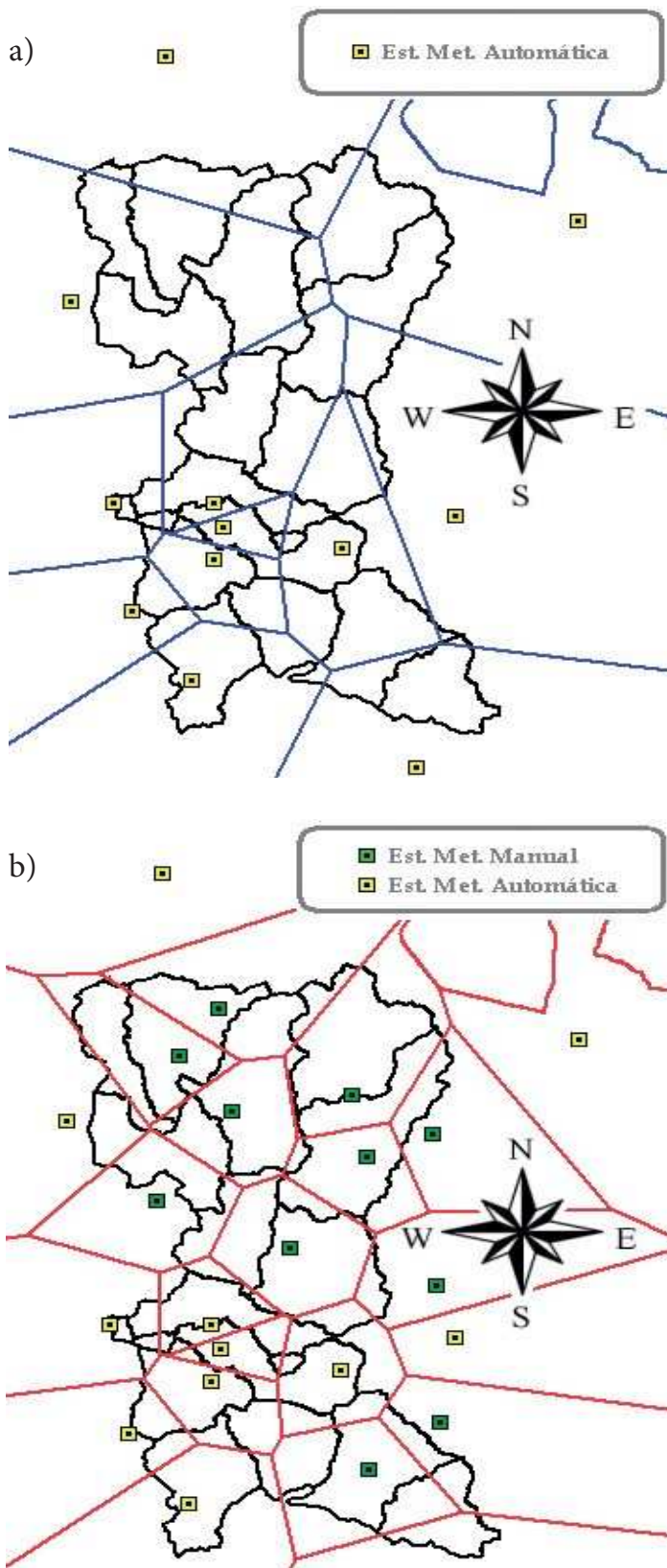
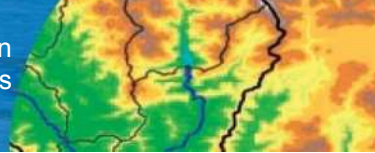


Figura 6: Áreas de influencia determinadas mediante Polígonos de Thiessen: a) únicamente de las estaciones meteorológicas automáticas EMA y b) de ambas automáticas y manuales conjuntamente EMAs + EMMs

determina por el método de los polígonos de Thiessen, según la ecuación (1). En la Figura 6a se representan las EMAS con influencia sobre la cuenca objeto de estudio y sus áreas de influencia. Se comprueba que en la zona de cabecera, la más montañosa y pluviosa, existen pocas estaciones, lo que supone un déficit de información importante para la estimación del hietograma de entrada al sistema. Si, por otra parte, se representan las EMM existentes en la cuenca, Figura 6b, se observa que esa zona queda bastante bien cubierta de estaciones. Por este motivo se ha simulado el modelo bajo estas dos consideraciones: solo con las EMAs y con las EMAs+EMMs, asumiendo la distribución temporal de los valores diarios de estas últimas según la distribución de las automáticas, de forma que el dato de diez minutos para las EMMs se ha estimado según (7).

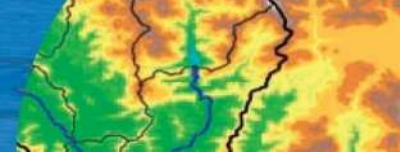
$$DDEMM = \sum_{i=1}^n \left[\left(DDEMA_i \frac{Pa_{EMM}}{Pa_{EMAn}} \right) Cp_i \right] \quad (7)$$

Donde, $DDEMM$ corresponde a dato de 10 minutos de la estación manual, $DDEMA_i$ dato de 10 minutos de la estación automática i , n es el número de EMAs con influencia en la estación manual, Pa_{EMM} es la precipitación diaria de la EMM, Pa_{EMAn} es la precipitación acumulada en un día de las EMAs y Cp_i es el coeficiente de ponderación areal de la EMA_i .

Caracterización de las subcuencas

En una subcuenca hay dos procesos que es preciso caracterizar: la determinación de la precipitación efectiva y la circulación de la misma por la cuenca; que en ambos casos se ha elegido el método del SCS. Hay que estimar, por lo tanto, el valor del CN y el de los parámetros asociados a él, S e I_a , en el primer caso y del T_t en el segundo.

Para la estimación del CN en cuencas no aforadas se parte de tablas que han sido elaboradas por diferentes Organismos de la Administración de EE.UU. (SCS, 1993; USDA 1959a, b) disponibles en Ponce (1989). En estas tablas de valores de CN se intentan describir situaciones complejas en las que se combinan distintas condiciones: grupo hidrológico de suelo, tratamiento y uso del suelo, condición hidrológica de la superficie, y condición antecedente de humedad. Con estas tablas y la información



digital disponible de la cuenca: mapa de suelos 1:50.000, mapa de usos 1:25.000 (Gobierno Navarra, 2001) se ha elaborado el mapa de *CN* de la cuenca del Arga para unas condiciones de humedad de referencia medias. Con este mapa se han determinado los valores de *CN* medios de las distintas subcuencas, así como los demás parámetros, *S* e *I_a*, cuyos valores se presentan en la Tabla 1. Aplicando a estos valores medios los criterios de la condición de humedad antecedente establecidos por el método (Ponce, 1989), en función de las zonas de influencia de cada estación meteorológica, se obtienen los valores de *CN* a aplicar en cada subcuenca y para cada evento.

Tabla 1: Valores de las áreas y de los parámetros hidrológicos medios en cada una de las subcuencas: *CN*, *I_a* y *T_l*.

Subcuenca	Área km ²	<i>CN</i>	<i>I_a</i> , mm	<i>T_l</i> , min
R10W10	43,618	69	22,82	26,40
R20W20	67,716	69	22,82	26,04
R30W30	39,451	85	8,96	23,15
R40W40	2,341	85	8,96	6,30
R50W50	3,246	85	8,96	7,32
R60W60	74,530	62	31,14	33,30
R170W70	52,553	65	27,35	28,50
R120W80	61,437	64	28,58	32,28
R150W90	32,739	66	26,17	25,80
R410W100	83,099	62	31,14	37,38
R440W120	45,535	80	12,70	21,96
R310W130	41,029	81	11,92	16,20
R340W140	40,997	78	14,33	18,06
R290W150	50,085	76	16,04	20,22
R370W160	56,328	73	18,79	17,04
R350W170	37,076	70	21,77	16,08
R390W180	68,836	61	32,48	23,34
R420W190	2,866	81	11,92	4,50

En lo que se refiere a la caracterización de la escorrentía a lo largo de la cuenca, es decir la generación del hidrograma en la subcuenca, el método utilizado es el HU del SCS, lo que implica que el parámetro a estimar es el tiempo de

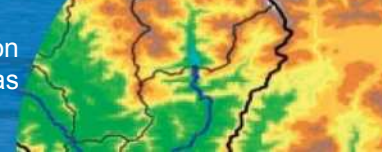
desfase, *T_l*, que se estima mediante la expresión (5). Los valores de este parámetro para cada subcuenca también se presentan en la Tabla 1.

Caracterización de los canales

En este epígrafe se trata de estimar los parámetros del método de Muskingum que son el tiempo de circulación, *k*, y el coeficiente de almacenamiento, *x*. Este último parámetro ya se ha indicado que es poco sensible y se adopta el valor de 0.2 (Chow *et al.*, 1989). En el caso del tiempo de tránsito o circulación del hidrograma de avenida, *k*, para cada uno de los tramos de cauces de ríos, se ha estimado a partir de la celeridad de la onda de avenida, cuyo valor se ha determinado en base a estudios hidráulicos, realizados por el Ayuntamiento de Pamplona, y a valores de pendiente medias de los tramos. Cada tramo se ha dividido en subtramos, cuyo número se ha determinado al dividir la longitud de cada tramo por el producto de la celeridad y el intervalo de tiempo de simulación elegido. En la Tabla 2 se presentan los valores de los parámetros del modelo de Muskingum para cada uno de los canales considerados en el modelo de la cuenca representado en la Figura 5.

Tabla 2: Valores de los parámetros del método de Muskingum: *k* y *x*, y de la celeridad, *c*, para los distintos cauces.

Tramo	Longitud, m	<i>c</i> , m/s	<i>x</i>	<i>k</i> , hr	Subtramos
R10	14119,3	1,5	0,2	2,6	16
R20	4106,7	1,1	0,2	1,0	6
R40	2894,0	1,3	0,2	0,6	4
R30	14123,9	1,3	0,2	3,0	18
R50	3529,9	1,5	0,2	0,7	4
R140	6447,7	1,5	0,2	1,2	7
R200	8309,1	1,1	0,2	2,1	13
R250	4748,1	1,1	0,2	1,2	7
R280	4437,0	1,1	0,2	1,1	7
R280	4437,0	1,1	0,2	1,1	7
R340	15309,8	1,3	0,2	3,3	20
R370	6241,6	1,1	0,2	1,6	9
R380	10863,7	1,5	0,2	2,0	12
R410	3661,0	1,5	0,2	0,7	4
R440	10742,9	1,1	0,2	2,7	16



Descripción de los eventos y extracción del flujo base

Para el análisis y aplicación del modelo HEC-HMS se han seleccionado 5 eventos de avenida, los más representativos en cuanto a magnitud y efectos en la urbe de los años en los que se dispone de datos de precipitación cada diez minutos, es decir, de las estaciones meteorológicas automáticas. ¿Por qué solo de estos años?, porque es de los que se dispone de la distribución temporal de la lluvia. Las características de estos eventos se presentan en la Figura 7 y en la Tabla 3.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en este estudio utilizamos el HEC-HMS considerando únicamente la componente de flujo superficial directo. Es preciso, por lo tanto, estimar el flujo base y separarlo del hidrograma de caudal observado en la estación de aforo, para poder compararlo con el simulado por el modelo. La extracción del flujo base se ha realizado utilizando un filtro recursivo, concretamente, el propuesto por Eckhardt (2005) de dos parámetros. Su expresión viene dada por la ecuación (8):

$$q_i = \frac{(1 - BFI_{max})}{1 - a BFI_{max}} [Q_i - a(Q_{i-1} - q_{i-1})] ; \quad q_i \geq 0 \quad (8)$$

donde q_i es la escorrentía directa en el instante i , Q_i es la escorrentía total en el instante i , a es una constante de recesión del flujo subterráneo y BFI_{max} es el índice del flujo subterráneo. El parámetro a , se relaciona con la recesión del flujo base mientras que el parámetro BFI_{max} , indica la máxima proporción de flujo base, con respecto a la escorrentía total, que se alcanzaría en la condición de equilibrio, si el almacenamiento de la cuenca se mantuviese constante en un periodo de tiempo suficientemente largo.

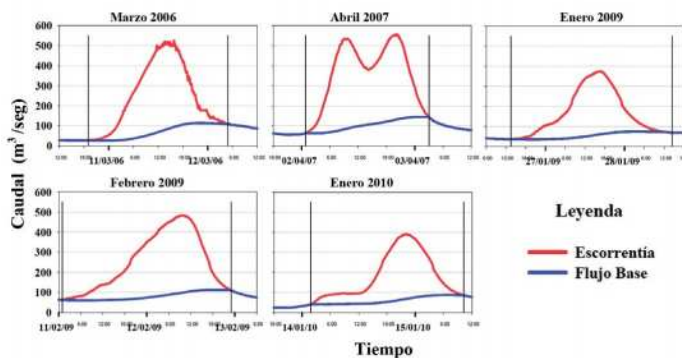


Figura 7: Representación de los hidrogramas observados de cada evento en la estación de Arazuri con la separación del flujo base

Tabla 3: Valores de las características de cada evento y de los parámetros del filtro de Eckhardt (2005) a y BFI_{max}

EVENTO	Duración días	Q_{max} , m³/s	a	BFI_{max}
Marzo 2006	10 al 12	525.5	0,998	0,6
Abril 2007	2 al 4	556.8	0,999	0,7
Enero 2009	26 al 29	374.1	0,999	0,6
Febrero 2009	11 al 13	483.9	0,999	0,6
Enero 2010	14 al 15	391.6	0,999	0,7

Los valores de los parámetros se han establecido adoptando criterios gráficos de ajuste, de forma que el hidrograma de escorrentía subsuperficial generado se ajuste adecuadamente al hidrograma observado. Así, el valor del parámetro a se ajustó a un valor de 0.999 y el parámetro BFI_{max} oscila entre 0.6 y 0.7. En la Tabla 3 se presentan los valores de dichos parámetros ajustados para cada uno de los eventos.

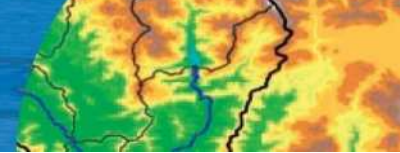
Análisis y resultados del modelo

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es fundamental para comprobar el grado de dependencia de los resultados del modelo con respecto a los parámetros más importantes. Se ha realizado sobre los parámetros más significativos de los métodos utilizados: número de curva CN ; pérdidas iniciales I_a ; tiempo de tránsito de la circulación en cauces k y tiempo de desfase T_i ; y en un hidrograma observado, la avenida de marzo 2006. Para evaluar el grado de sensibilidad se ha determinado el índice de sensibilidad, IS , descrito por Nearing *et al.* (1989):

$$IS = \left| \frac{(O_{Max} - O_{Min}) / O_{Med}}{(I_{Max} - I_{Min}) / I_{Med}} \right| \quad (9)$$

En donde I_{Max} es el valor máximo del parámetro a analizar; I_{Min} es el valor mínimo de dicho parámetro; y I_{Med} es el valor medio; O_{Max} es el valor máximo de la variable de salida a evaluar; O_{Min} es su valor mínimo; y O_{Med} es el valor medio. En este caso la variable evaluada ha sido el caudal máximo,



Q_{max} . Un valor de IS igual a 1 indica que los incrementos de ambas distribuciones de valores son iguales.

El análisis de sensibilidad del parámetro CN se ha realizado utilizando intervalos de valores de los números de curva medios de toda la cuenca. Estos intervalos se han establecido de forma porcentual a la diferencia entre 100 (valor máximo) y el valor del CN medio de la cuenca.

Según el método del SCS , el valor de las pérdidas iniciales I_a , viene dado por el 20% de las pérdidas potenciales máximas ($I_a=0.2S$), aunque realmente dicho valor de 0.2 se puede considerar como un coeficiente de pérdidas incierto C_p , de forma que $I_a = C_p S$. Dado que cuando se trata de avenidas extraordinarias las condiciones iniciales del suelo son críticas, es importante comprobar la sensibilidad del modelo con respecto a la variación del parámetro C_p , tomando también valores de 0.05 y 0.1. Otro parámetro importante en la circulación de avenidas es el tiempo de propagación, k . Igual que en los casos anteriores, dejando todos los demás parámetros fijos, se ha ejecutado el modelo para valores de k superiores en media hora a los estimados para cada tramo, e inferiores en media hora. En el caso del tiempo de desfase, T_i , también se ha ejecutado el modelo variando el valor de dicha variable de forma porcentual, tal como se muestra en la Figura 8 y Tabla 4. Los resultados de dicho análisis se presentan en la Figura 8 y en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4: Valores del tiempo en el máximo T_p , y del caudal máximo Q_{max} , estimados para los distintos escenarios del análisis de sensibilidad considerados

Parámetro	Variación	Valor parámetro	T_p , hr	Q_p , m ³ /s
CN	$CN_{ref} - 40\%$	57	12:30	122,5
	$CN_{ref} - 20\%$	63	12:00	149,5
	CN_{ref}	71	12:00	185,1
	$CN_{ref} + 20\%$	76	12:00	230,1
	$CN_{ref} + 40\%$	82	12:00	265,3
	$CN_{ref} + 60\%$	88	11:30	370,8
	$CN_{ref} + 80\%$	94	11:30	487,7
I_a , mm	$I_{a,ref} = 0,20S$	22,9	12:00	185,1
	$I_{a,ref} = 0,10S$	11,5	11:30	256,6
	$I_{a,ref} = 0,05S$	5,7	11:00	288,3
k , hr	$k_{ref} - 0,5$	1,2	10:00	204,3
	k_{ref}	1,7	12:00	185,1
	$k_{ref} + 0,5$	2,2	14:00	170,1
T_i , hr	$T_{i,ref}$	21,3	12:00	185,1
	$T_{i,ref} + 20\%$	25,6	12:00	184,5
	$T_{i,ref} + 40\%$	29,9	12:30	184,8

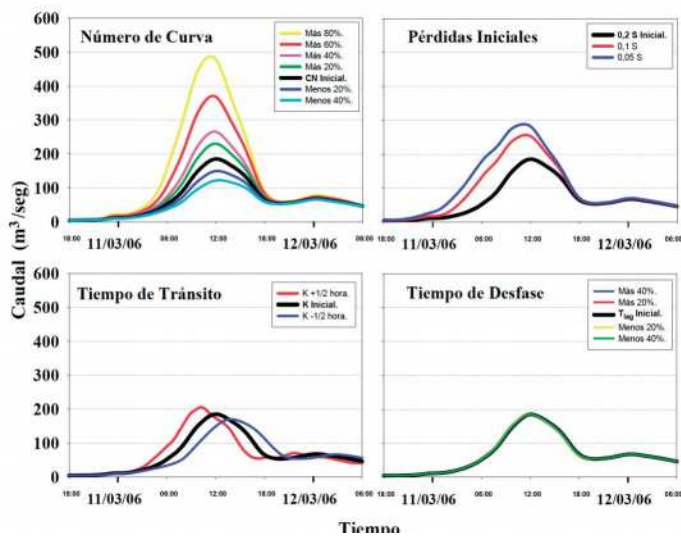


Figura 8: Representación del análisis de sensibilidad de los parámetros más representativos del modelo: CN , I_a , T_i , k

De la Figura 8 y de la Tabla 4, se deduce que el número de curva CN , es el parámetro más sensible, su variación tiene un gran efecto sobre el valor del caudal simulado (hidrograma), fundamentalmente con respecto al volumen del hidrograma y al caudal máximo o punta y, sin embargo, es menos sensible respecto al tiempo en el máximo (Figura 8). El parámetro de pérdidas iniciales I_a , también manifiesta un efecto importante sobre el volumen de escorrentía. Una disminución del valor de I_a hace que el aporte de la lluvia caída se transforme con mayor rapidez en escorrentía, anticipando y elevando la curva de ascenso del hidrograma. Consecuencia de esto es que el caudal máximo Q_{max} y el tiempo en el máximo T_p , sean sensibles al valor I_a , aunque

mucho menos al segundo que al primero. En referencia al tiempo de tránsito k , es evidente que la disminución o el aumento del valor de dicho parámetro provocará una anticipación o un retardo respectivamente en el hidrograma de salida y, por lo tanto, del tiempo en el máximo T_p y, por lo tanto, un aumento o disminución respectivamente del valor del caudal máximo Q_{max} . Por último, en la Figura 8 se pone de manifiesto que el efecto de la variación del tiempo de desfase T_b , en el hidrograma simulado es inapreciable, mucho menor que el de los otros parámetros analizados.

Tabla 5 : Valores del índice de Nearing IS , obtenidos por intervalos de valores de los parámetros CN , k , y I_a

Parámetros	Intervalos de variación	I. Nearing IS
CN	$CN_{ref}-40\%$ y $CN_{ref}-20\%$	1,99
	$CN_{ref}-20\%$ y CN_{ref}	1,78
	CN_{ref} y $CN_{ref}+20\%$	3,19
	$CN_{ref}+20\%$ y $CN_{ref}+40\%$	1,87
	$CN_{ref}+40\%$ y $CN_{ref}+60\%$	4,70
	$CN_{ref}+60\%$ y $CN_{ref}+80\%$	4,13
I_a , mm	0,20S y 0,10S	2,06
	0,10S y 0,05S	4,28
k , hr	k_{ref} y $k_{ref}-0,5$	3,45
	k_{ref} y $k_{ref}+0,5$	3,08

Para cuantificar este efecto o sensibilidad de los parámetros, se ha utilizado el índice de sensibilidad de Nearing, IS , ecuación (9). El valor de este índice se ha estimado por intervalos del valor del parámetro, para ver también como varía la sensibilidad en función de los valores.

De esta forma, se ha podido apreciar que el modelo es muy sensible al valor de CN fundamentalmente para valores elevados, así mismo se ha comprobado que el modelo también es muy sensible al valor de I_a , pero en este caso la sensibilidad es mayor para valores bajos del parámetro. En el caso del parámetro k , se ha observado que su sensibilidad no depende de la magnitud de su valor. Y en el caso del T_b , el modelo es tan insensible a su valor, valores del IS próximos a cero, que se han omitido los resultados.

Resultados

Como se ha comentado en la implementación del modelo, debido a la escasez EMAs en la cuenca, se han realizado dos simulaciones: considerando únicamente EMAs; y utilizando ambas, automáticas EMAs y manuales EMMs. En la Figura 9 se observa como al tener en cuenta las EMMs mejora el resultado de la simulación, evidentemente la mejora no es uniforme dependerá de la distribución espacial y temporal de la lluvia. No obstante, de este análisis gráfico preliminar ya se concluye que el resultado de la simulación en el caso de EMAs+EMMs es bastante aceptable para ser una mera aplicación del modelo HEC-HMS sin ningún tipo de calibración, a excepción del evento de abril de 2007 que es un episodio compuesto con dos puntas. En estos episodios complejos, la incertidumbre en la estimación del flujo base es mayor, y esa incertidumbre es transmitida a las hipótesis de partida de la metodología seleccionada para determinar el hidrograma de escorrentía directa de salida de las cuencas.

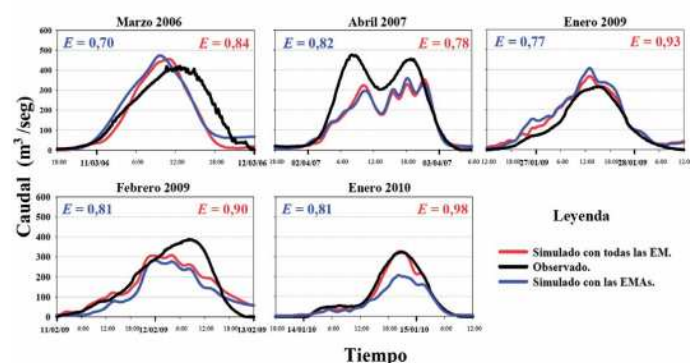


Figura 9: Comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación con EMAs y con EMAs + EMMs

Para evaluar estos resultados de la aplicación del modelo se han determinado los errores absolutos y los relativos en % de diferentes parámetros, como el volumen del hidrograma, VED , el caudal máximo o punta Q_{max} , y el tiempo en el máximo, T_p . También se ha calculado el valor de la Eficiencia E , según Nash y Sutcliffe (1970) dado por la ecuación (10), que refiere el grado de error obtenido de forma normalizada y adimensional.

$$E = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m [Q_{obs,j} - Q_{sim,j}]^2}{\sum_{j=1}^m [Q_{obs,j} - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (10)$$



Tabla 6: Valores de los errores relativos y de la Eficiencia E , obtenidos en la estimación de Q_{max} , T_p y en el Volumen de Escorrentía Directa VED

Parámetros		Eventos				
		Marzo 2006	Abril 2007	Enero 2009	Febrero 2009	Enero 2010
Caudal máximo Q_{max} , m ³ /s	Observado	419,40	475,60	387,20	314,80	324,00
	Simulado	455,50	345,60	321,00	358,90	322,00
	Dif. abs	-36,10	130,00	66,20	-44,10	2,00
	Dif. (%)	-8,61	27,33	17,10	-14,01	0,62
Tiempo en punta T_p , hr	Observado	35,83	27,00	8,00	26,67	20,00
	Simulado	19,83	38,83	7,50	27,50	29,00
	Dif. Abs.	16,00	-11,83	0,50	-0,83	-9,00
	Dif. (%)	44,66	-43,81	6,25	-3,11	-45,00
Volumen de VED, m ³	Observado	20.727.060	28.457.280	20.169.540	28.738.920	14.714.880
	Simulado	17.282.160	18.572.400	22.879.800	30.086.040	13.191.900
	Dif.	3.444.900	9.884.880	-2.710.260	-1.348.120	1.522.980
	Dif. (%)	16,62	34,74	-13,44	-4,69	10,35
Eficiencia E		0,84	0,78	0,93	0,90	0,98

Donde Q_{sim} es el caudal simulado; Q_{obs} es el caudal observado y \bar{Q}_{obs} es el caudal medio observado. Este índice representa la relación entre la varianza del error y la varianza de la serie de observaciones, valores cercanos a 1 implican un buen ajuste y valores menores o cercanos a 0, indican que el modelo no es mejor que usar el promedio de las observaciones.

Todos estos índices de ajuste se presentan en la Tabla 6 para cada evento. Se pone de manifiesto de nuevo lo ya comentado, es decir, la bondad de los ajustes en los resultados excepto para el evento de abril del 2007. En los valores de eficiencia, hay tres eventos por encima de 0.9 y los otros dos están o próximos a 0.8 o por encima. Las diferencias relativas respecto al caudal punta y al volumen de escorrentía son bastante aceptables, excepto el caso indicado.

Conclusiones

Los buenos resultados obtenidos en la aplicación del

modelo HEC-HMS en la cuenca del río Arga a su paso por Pamplona, a los 5 sucesos de avenida más significativos de los últimos 10 años, dan por válido el trabajo previo de caracterización física e hidrológica de la cuenca, como la estructura fisiográfica de la cuenca y la asignación de valores a los distintos parámetros CN , T_b , x , k , que caracterizan los procesos hidrológicos considerados. Únicamente hay que indicar que la densidad o el número de estaciones meteorológicas automáticas, que son las que permiten registrar la distribución temporal de las tormentas, es escaso en la zona de cabecera de la cuenca, precisamente en la zona más montañosa y con más pluviometría, lo que a efectos de valoración de recursos hídricos es un déficit importante.

Del análisis de sensibilidad, se concluye que el número de curva CN , es el parámetro más sensible, su variación tiene un gran efecto sobre el valor del caudal simulado (hidrograma).

Con respecto a las pérdidas iniciales I_a , se aprecia también



que es bastante sensible aunque en menor medida, su variación provoca un efecto importante en el volumen de escorrentía. En referencia al tiempo de tránsito k , es evidente que la disminución o el aumento del valor de dicho parámetro provocará una anticipación o un retardo respectivamente en el hidrograma de salida y , por lo tanto, del tiempo en el máximo T_p ; así como un aumento o disminución respectivamente del valor del caudal máximo Q_{max} . Por último, el tiempo de desfase T_i , es un parámetro poco sensible en el hidrograma simulado, mucho menor que el de los otros parámetros analizados.

La introducción de los datos de las series de precipitación diaria, con las distribuciones temporales ponderadas de las series de precipitación de las estaciones automáticas (cada 10 minutos), mejoran significativamente los resultados de la simulación, es decir, los hidrogramas simulados.

Los resultados de la aplicación del modelo, aportan valores de eficiencia E , muy satisfactorios en cuatro de cinco avenidas; y, en general, aportan mejores resultados para los caudales, caudal punta y volumen de escorrentía, que para el tiempo en el máximo.

Agradecimientos

Se quiere expresar el agradecimiento tanto al Servicio de Aguas del Gobierno de Navarra como a Sección de Hidrología de la Confederación Hidrológica del Ebro por haber facilitado todo tipo de información para llevar a cabo este trabajo.

Referencias

Al-Abed, N., Abdulla, F. and Abu Khyarah, A. (2005). GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin. *Environmental Geology* **47**(3), 405-411.

Ayuntamiento de Pamplona (2003). Plan Municipal de Pamplona. Boletín Oficial de Navarra (BON) 02/05/2003.

Bedient, P.B. and Huber, W.C. (1990). *Hydrology and Floodplain Analysis*. Addison-Wesley, Reading

CEE (2007). Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 23 de octubre del 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Diario Oficial de la Unión Europea (06/11/2007), L: 288: 27-34.

Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1989). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill

Chu, X. and Steinman, A. (2009). Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **135**(1), 119-124.

Cunderlik, J. and Simonovic, S.P. (2004). Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model. Water Resources Research Report. Book 11. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario. <http://ir.lib.uwo.ca/wrrr/11>.

Cydzik, K. and Hogue, T.S. (2009). Modeling postfire response and recovery using the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). *Journal of the American Water Resources Association* **45**(3), 702-714.

Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* **19**, 507-515

Emerson, C.H., Welty, C. and Traver R.G. (2005). Watershed-scale evaluation of a system of storm water detention basins. *Journal of Hydrologic Engineering* **10**(3), 237-242

Gobierno de Navarra (2001). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de Navarra (MCAN) 1:25.000. Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra. Sección de Suelos y Climatología. Pamplona, Navarra.

Iglesias, D. (2008). *Estudio de los sucesos extraordinarios de lluvia y sus efectos en la cuenca del río Arga*. Trabajo Final de Carrera. E.T.S.I.A., Universidad Pública de Navarra.

Kang, B. and Ramírez, J.A. (2007). Response of streamflow to weather variability under climate change in the Colorado Rockies. *Journal of Hydrologic Engineering* **12**(1), 63-73.

Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K. and Maidment, D.R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management* **75**(4), 325-336.

McCull, C. and Aggett, G. (2007). Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. *Journal of Environmental Management* **84**, 494-512.

McLin, S.G., Springer, E.P. and Lane, L.J. (2001). Predicting floodplain boundary changes following the Cerro Grande wildfire. *Hydrological Processes* **15**(15), 2.967-2.980.

Mockus, V. (1969). National Engineering Handbook, section 4: Hydrology. United States Department of Agriculture (USDA). Soil Conservation Service (SCS), Washington, D.C.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282-290

- Nearing, M.A., L.D. Ascough, and Chaves H.M.L. (1989). WEPP model sensitivity analysis. WEPP-USDA Water Erosion Prediction Project. USDA-ARS-NSERL, 2, 14.1-14.33.
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall. New Jersey
- SCS (1993). Soil Survey Manual. Handbook 18. Soil Survey Division Staff. Agricultural Research Administration. United States Department of Agriculture (USDA).
- Treviño, A. y Ortiz, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones Geográficas* 35, 67-83.
- USDA (1959a). Forest and Range Hydrology Handbook. United States Department of Agriculture, Forest Service. Washington D.C.
- USDA (1959b). Handbook on Methods of Hydrology Analysis. United States Department of Agriculture, Forest Service. Washington D.C.
- Viessman, W. and Lewis, G.L. (1996). *Introduction to Hydrology*. Harper Collins. New York.
- Yusop, Z., Chan, C.H. and Katimon, A. (2007). Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. *Water Science & Technology* 56(8), 41-48.

EMPRO Ltda.

Ensayos de Materiales y Prospecciones Limitada

Suelos - Hormigones - Asfaltos

25 años

al servicio de la región y el país

Ingeniería
Mecánica de Suelos
Fundaciones
Taludes
Mejoramiento de Terreno

Prospección de Suelos
Sondajes Marítimos
Sondajes Terrestres
Calicatas

Control de Obras Civiles
Densidad In Situ
Hormigones
Asfaltos

Laboratorio Acreditado
bajo NCh-ISO 17025 y
registro vigente MINVU



Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso

Monthly water balance of a Patagonia Basin of Chile: application of a parsimonious model

Fecha de entrega: 23 de agosto 2012

Fecha de aceptación: 13 de noviembre 2012

José Vargas¹, Luis De La Fuente² y José Luis Arumí³

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Correo 3, Concepción, Chile, jvargas@udec.cl

² RyQ Ingeniería S.A., Miguel Claro 578, Providencia, Santiago, Chile, luis.delafuente@ryq.cl

³ Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Chillán, Chile, jarumi@udec.cl

La necesidad de conocimiento específico del funcionamiento e interacción de los fenómenos hidrológicos en una cuenca, hace necesario la aplicación de modelos hídricos mensuales que permitan cuantificar la variación de los almacenamientos en una zona donde los datos existentes son escasos o muy recientes. Este trabajo se realizó en el periodo hidrológico desde 1980/1981 al 2000/2001 en la cuenca del río Simpson (subcuenca del río Aysén), ubicada en la Región de Aysén, Patagonia chilena (Latitud Sur 45°20' - 46°10'). El modelo utilizado corresponde a un modelo parsimonioso de 6 parámetros ligeramente modificado a las características de la zona en estudio, para el cual se posee una distribución espacial de la precipitación y evapotranspiración potencial, obtenida con geoestadística y evapotranspiración de referencia de Hargreaves y Samani. Como resultado se obtuvo la distribución mensual de los almacenamientos con correlaciones del modelo de 0.88 en la calibración y 0.83 en la validación, y un error del balance hídrico medio anual menor al 5%.

Palabras clave: balance hídrico, modelo parsimonioso, Patagonia chilena

The need for specific knowledge of the functioning and interaction of hydrological phenomena in a basin necessitates the application of monthly water models to quantify the change in storage of an area where collected data are scarce or very recent. This work was performed in the hydrologic period from 1980/1981 to 2000/2001 in the Simpson river basin (basin of the river Aysén), located in the Aysén Region, Chilean Patagonia (South Latitude 45°20' - 46°10'). A parsimonious model of 6 parameters, slightly modified to the characteristics of the study area, is used; for which a spatial distribution of precipitation and potential evapotranspiration is obtained with geostatistic and Hargreaves and Samani reference evapotranspiration. The result was a monthly distribution of the storage model with correlations of 0.88 and 0.83 for the calibration and validation periods, respectively, and an average annual water balance error less than 5%.

Keywords: water balance, parsimonious model, Chilean Patagonia

Introducción

la aplicación de balances hídricos anuales permite cuantificar los distintos fenómenos hidrológicos en una cuenca: precipitación, evapotranspiración y escorrentía, más aún la obtención de un balance de paso mensual entrega información detallada de la variación de los almacenamientos que permiten obtener un conocimiento más completo de la cuenca. Sin embargo, no siempre existe la cantidad de información que permitan tales

balances, por lo cual el uso de modelos hidrológicos de paso mensual permite suplir aparentemente esta escasez de datos y avanzar en el conocimiento a la espera que en el futuro sea posible validar los resultados de estos.

Descripción de la cuenca

La cuenca hidrográfica del río Simpson, área de estudio del proyecto, se encuentra en su mayor parte en una zona climática intermedia caracterizada por la presencia

de un clima trasandino con degeneración estepárica de considerable amplitud térmica; entre 45°20' y 46°10' de Latitud Sur y 71°25' y 72°30' de Longitud Oeste (Figura 1). La cuenca abarca una superficie de 3.975 km² y acoge a aproximadamente 50.000 habitantes de la Región de Aysén, Chile (DGA, 2004). La topografía del sector presenta una gran variabilidad de Oeste a Este debido a la presencia de la cordillera de los Andes en la zona occidental del área de estudio con cotas de aproximadamente 2000 msnm, para llegar a la zona más oriental de la cuenca con alturas aproximadas de 700 msnm.

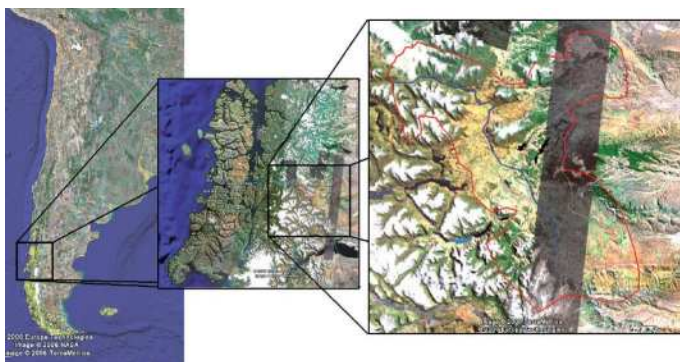


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Simpson. Fuente: Google Earth.

Balance hídrico

La ecuación del balance hídrico (1), indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en una región. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación P , en forma de lluvia o nieve, y las aguas superficiales y subterráneas Q_I . Las salidas incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua E , la evapotranspiración desde el suelo y la vegetación ETR , y la salida de agua superficial y subterránea desde la cuenca Q_S . Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada ΔS aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P + Q_I - E - ETR - Q_S \quad (1)$$

El almacenamiento en una cuenca ΔS se puede dividir básicamente en nival ΔS_{Snow} , superficial N (lagos y red de drenaje, ΔS), subsuperficial ΔS_b y subterráneo ΔG . Considerando estos parámetros en (1) resulta:

$$\frac{\Delta S_{\text{Snow}}}{\Delta t} + \frac{\Delta N}{\Delta t} + \frac{\Delta S_b}{\Delta t} + \frac{\Delta G}{\Delta t} \approx P - E - ETR - Q_S \quad (2)$$

La determinación del balance hídrico para un año medio es el caso más simple, ya que se puede despreciar la variación del volumen de agua almacenada en la cuenca ΔS . Para un largo período, los incrementos del agua almacenada, positivos y negativos, a escala anual, tienden a equilibrarse y su valor neto al final puede considerarse igual a cero. La situación contraria ocurre cuando se calculan los balances hídricos para períodos cortos, para los cuales $\Delta S \neq 0$. Cuanto más corto es el intervalo de tiempo, más preciso debe ser la medida y determinación de los componentes del balance hídrico y más subdividido estarán los valores de ΔS y de otros elementos. Esto da como resultado una ecuación del balance compleja, que es difícil de ajustar aceptablemente cuando hay escasos de datos de campo (Sokolov *et al.*, 1981).

Las medidas y determinaciones de los elementos del balance hídrico siempre tienen errores, por lo que generalmente el balance hídrico no es exacto. La inexactitud viene representada por un término residual η , que incluye los errores en la determinación de los componentes y los valores de los componentes que no se han tenido en cuenta. Con lo cual la ecuación final para cualquier Δt es la siguiente,

$$\frac{\Delta S_{\text{Snow}}}{\Delta t} + \frac{\Delta N}{\Delta t} + \frac{\Delta S_b}{\Delta t} + \frac{\Delta G}{\Delta t} = P - E - ETR - Q_S + \eta \quad (3)$$

Balance hídrico anual 1987

El primer Balance Hídrico realizado en la zona fue hecho en 1987 y fue realizado por la Dirección General de Agua DGA de Chile. Las series utilizadas correspondían a datos entre 1961 y 1980. En este balance se consideró un balance hídrico medio anual con lo cual los términos de almacenamiento en (3) tienden a cero. El método para la determinación del balance hidrológico utilizó además el trazado de mapas de isoyetas e isothermas medias anuales que permitió deducir el mapa de isolíneas de evapotranspiración de superficies naturales según la expresión de Turc.



$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}, \text{ válida si } P > 0.31L \quad (4)$$

Donde ET es la evapotranspiración real en mm/año, P es la precipitación media anual en mm/año y L es definido por la siguiente ecuación donde T es la temperatura media anual en °C.

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (5)$$

La metodología para cerrar el balance consideró dos situaciones, las cuencas con y sin control fluviométrico. En el primer caso, al poder evaluarse en forma independiente los términos de precipitación, caudal y evapotranspiración se obtuvo un valor de discrepancia η . Si dicho término había sido demasiado grande entonces se modificaba el trazado de las isoyetas hasta encontrar un η aceptable. En el segundo caso cuando no se disponía de control fluviométrico, el término de discrepancia η no era posible de determinarse, por lo cual la ecuación de balance fue utilizada para deducir el valor de la escorrentía faltante. El término de discrepancia η se consideró aceptable si era menor al 10%, si no se debió iterar para conseguir un error aceptable de acuerdo a lo anteriormente mencionado. Con esta metodología se obtuvo el Balance Hídrico para la cuenca del río Simpson, el cual es resumido en Tabla 1.

Tabla 1: Balance Hídrico Anual de la Cuenca del Río Simpson (1961-1980)

Superficie, km ²	Precipitación		Escorrentía		Evapotranspiración Real		Evaporación	
	mm/año	m ³ /s	mm/año	m ³ /s	mm/año	m ³ /s	mm/año	m ³ /s
3676	1458	170	884	103	440	51.3	2.57	0.3

Fuente: Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987)

La discrepancia estimada fue de -131 mm/año, un -9% con respecto a la variable de mayor magnitud.

Descripción de componentes del balance hídrico

En el balance hídrico de una cuenca, toda la información

debe encontrarse integrada, con lo cual cada componente poseerá metodologías diferentes de integración. A continuación se realiza una descripción general de la información disponible y un resumen de la integración de cada variable.

Precipitación

La información disponible consta de 11 estaciones pluviométricas indicadas en la Tabla 2 y distribuidas como se muestra en la Figura 2. A partir de estos registros de precipitación mensual se hace una interpolación espacial con herramientas geoestadísticas obteniéndose un archivo semejante a una malla rectangular (grilla). Una vez generado este archivo se obtiene el valor en cada una de las celdas de la malla (UNESCO-IMTA, 2006).

Tabla 2: Estaciones pluviométricas disponibles

Estación	Periodo en servicio	Latitud ° ' "	Longitud ° ' "	Altura, msnm	Precip. media anual, mm
Estero Perdido	1981-1987	45 32 30	72 40 00	80	3460.4
Puerto Chacabuco	1965-2005	45 28 03	72 49 00	10	3385.1
Puerto Aysén	1931-2004	45 24 03	72 42 00	10	2786.6
Desagüe Lago Caro	1981-1987	45 47 45	72 36 07	285	2473.5
El Balseo	1980-2004	45 24 03	72 29 00	150	1621.1
Villa Mañihuales	1986-2004	45 10 03	72 09 00	150	1603.2
Coyhaique Escuela Agrícola	1984-2004	45 34 03	72 02 00	343	937.5
Villa Ortega	1980-2004	45 22 03	71 59 01	550	766.0
Balmaceda	1980-1987	45 55 00	71 41 00	520	564.0
Ñirehuao	1993-2004	45 15 03	71 43 01	535	551.4
Coyhaique Alto	1962-2004	45 29 03	71 36 01	730	318.8

Escorrentía

La cuenca en estudio actualmente no posee una estación de cierre, con lo cual se hace necesario realizar una transposición de caudales desde estaciones insertas en la cuenca que presenten comportamiento hidrológico similar y cuyos datos estadísticos sean confiables y están indicadas en la Tabla 3. Las estaciones disponibles indicadas en la Tabla 3 se muestran en la Figura 2.

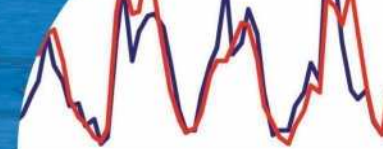


Tabla 3: Estaciones fluviométricas disponibles

Estación	Periodo en servicio	Latitud ° ' "	Longitud ° ' "	Área, km ²	Caudal medio anual específico, mm
Río Coyhaique en Tejas Verdes	1979-2003	45 34 03	72 02 00	605.8	305.7
Río Huemules frente a cerro Galera	1979-2003	45 50 17	71 46 37	-	183.9
Río Simpson después de junta con Coyhaique	1969-2003	45 33 03	72 04 00	3219.2	406.3

La estadística fluviométrica a la salida de la cuenca Q se convierte a caudal específico Q_s , donde A es área de la cuenca.

$$Q_s = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

La estación base utilizada corresponde a río Coyhaique en Tejas Verdes, por ser la que presenta mayor cantidad de años completos y por ser la que entrega mayor confianza en la toma de datos luego de la visita a terreno realizada. Además, esta subcuenca posee una distribución de la vegetación similar a la cuenca completa. No obstante lo anterior, la estación base fue utilizada solo para completar y ampliar la estadística de la estación del río Simpson bajo junta Coyhaique y no para la generación de la estadística en el punto de cierre de la cuenca (río Simpson antes de la junta del río Mañihuales, sector Balseo). Esto debido a que la relación entre el área de esta subcuenca y la cuenca completa no es la adecuada, es decir, la estación base posee un área de 606 km² versus la estación del río Simpson después de junta con Coyhaique que posee un área de 3219 km² y la cuenca completa del río Simpson que posee 3972 km². Posteriormente se realizó la transposición desde la estación del río Simpson hasta el punto de cierre de la cuenca.

Evapotranspiración y evaporación

Los mismos factores que dominan la evaporación de una superficie de agua abierta generan la evapotranspiración:

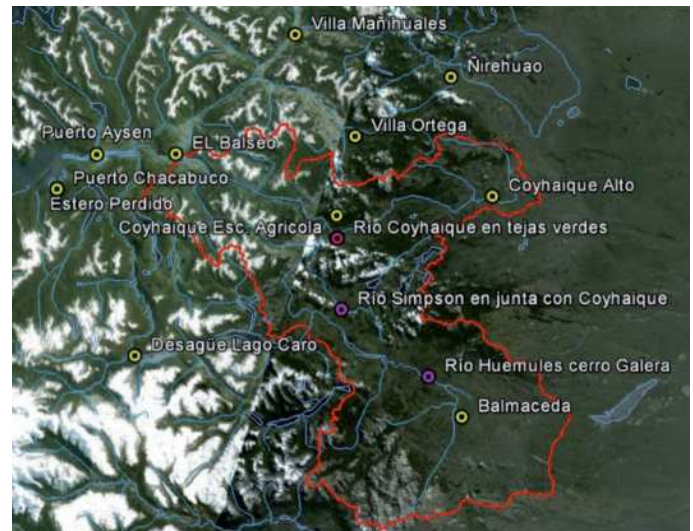


Figura 2: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas (amarillo) y fluviométricas (morado)

suministro de energía y transporte de vapor. Para la determinación de la evapotranspiración de referencia se posee información de viento, evaporación de bandeja, horas de sol, humedad relativa, temperaturas máximas, medias y mínimas. Sin embargo, la única información que posee un grado aceptable de confianza y datos suficientes por años, son los de temperatura. Por lo cual, se utilizó el método Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) para la determinación de la evapotranspiración de referencia, el cual necesita solamente datos de temperaturas y de radiación solar. El proceso siguiente fue determinar el coeficiente de cultivo, que permite convertir desde el cultivo de referencia a cualquier cobertura vegetal que exista en la cuenca. Las estaciones meteorológicas utilizadas se muestran en la Tabla 4.

Se construyeron mapas de isotermas que en conjunto con la información de uso de suelo hace posible estimar la evapotranspiración potencial. La evaporación desde superficies de agua abiertas es incorporada dentro de la evapotranspiración debido a la baja importancia relativa según su porcentaje de área (0.7%) y según el balance hídrico publicado por DGA (1987).

Almacenamientos

Según DGA (1987) el almacenamiento puede subdividirse en: almacenamiento de agua en los suelos no saturados, de agua subterránea en los acuíferos, en lagos y embalse, en los cauces de los ríos, en glaciares y en el manto de nieve.



Tabla 4: Estaciones térmicas utilizadas

Estación	Periodo en servicio	Lat. ° ' "	Long. ° ' "	Altura msnm	Temperatura media anual, °C
Villa Mañihuales	1986-2004	45 10 03	72 09 00	150	9.38
Coyhaique Escuela Agrícola	1984-2004	45 34 03	72 02 00	343	8.63
Villa Ortega	1980-2004	45 22 03	71 59 01	550	7.60
Balmaceda	1980-2004	45 55 00	71 41 00	520	6.97
Ñirehuao	1993-2004	45 15 03	71 43 01	535	8.18
Coyhaique Alto	1962-2004	45 29 03	71 36 01	730	7.31

La definición de almacenamiento saturado y no saturado permite la subjetividad de definir cual es el límite físico entre ambos, ya que sobre el nivel freático existe capilaridad que permite que ascienda agua, además la cantidad de agua que puede retener un suelo por capilaridad oscila desde 5% para suelos muy arenosos hasta un 35% en suelos arcillosos (Teuscher *et al.*, 1985). Además, el nivel freático oscila a nivel mensual lo que permite que aumente o disminuya el volumen potencial de almacenamiento del subsuelo. Todo lo anterior dificulta la cuantificación de estos almacenamientos en forma local y más aún de la realidad global de la cuenca.

El almacenamiento en lagos debe ser determinado en forma indirecta, ya que no existen mediciones de niveles en los lagos de la cuenca, sin embargo, la magnitud de área ocupada por estos no supera el 0.7 %, por lo que su participación en el balance es mínima. El almacenamiento en los cauces de los ríos, tampoco puede ser determinado directamente, por lo que se agrupará con el almacenamiento de los lagos en un almacenamiento superficial. Según información oficial en la cuenca no existen glaciares de importancia, por lo que su almacenamiento se estima de muy baja magnitud. Finalmente el almacenamiento en los mantos de nieve es muy importante, por lo que es necesario concentrar esfuerzos en estimar adecuadamente este aporte, para lo cual se utiliza el concepto de área nival en base a la curva hipsométrica y la temperatura umbral a la que la precipitación líquida se convierte en sólida, la que se estima en forma indirecta.

Modelo parsimonioso

Un modelo parsimonioso está basado en una simplificación de la representación de los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca de tal forma que sólo sea necesario calibrar un número reducido de parámetros (Xu y Singh, 1998, Orellana *et al.*, 2008). Este enfoque de modelación surgió por la necesidad de obtener información hidrológica relevante para la gestión de los recursos hídricos de cuencas que cuentan con información estadística limitada y se utiliza para análisis de balance hídrico a escala mensual (Pande *et al.*, 2011; Coutu *et al.*, 2012).

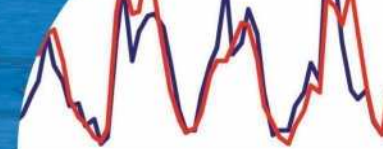
El modelo que se utilizó para este trabajo fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Tufts en Medford, Estados Unidos (Limbrunner *et al.*, 2005) y se basa en el uso del método de la curva número para evaluar la infiltración y generación de escorrentía superficial a paso diario, realizando el balance posteriormente a paso mensual. El modelo original propuesto por Limbrunner *et al.* (2005) considera cuatro parámetros para simular la evapotranspiración, la variación de la humedad del suelo, almacenamiento en un acuífero saturado con la generación de flujo base, acumulación y derretimiento de nieve y almacenamiento en los cauces superficiales. Sin embargo, el modelo resultó ser muy simplista para representar los procesos hidrológicos de la cuenca del Simpson, por lo que fue necesario considerar dos parámetros adicionales (T_b y α), que permitieron mejorar la predictibilidad del modelo.

Resumen del modelo

La esencia del modelo podría resumirse en que el caudal en el punto de cierre de la cuenca es la suma de la escorrentía directa desde la precipitación, el derretimiento y el flujo base. La evapotranspiración remueve agua desde la cuenca, la cual sale del agua almacenada en el subsuelo no saturado. Las ecuaciones principales que gobiernan el modelo se presentan a continuación. La primera de ellas, la infiltración $I(t)$, se definió como la diferencia entre la precipitación efectiva $P_e(t)$ y la escorrentía directa $R(t)$ que ingresa al suelo no saturado.

$$I(t) = P_e(t) - R(t) \quad (7)$$

La precipitación efectiva es la suma de la lluvia caída y el derretimiento. La ecuación de continuidad en el suelo no saturado está dada en función de una expresión recursiva



del almacenamiento previo $S(t-1)$, infiltración $I(t)$, percolación $Perc(t)$ y evapotranspiración $ET(t)$.

$$S(t) = S(t-1) + I(t) - Perc(t) - ET(t) \quad (8)$$

El almacenamiento de la zona de agua subterránea $G(t)$ es una función del almacenamiento previo, del flujo base $k_g G(t-1)$ y la percolación.

$$G(t) = G(t-1) + Perc(t) - k_g G(t-1) \quad (9)$$

El caudal a la salida de la cuenca entregado por la red de drenaje, la cual transporta el flujo base y la escorrentía, es calculado según:

$$Q(t) = kn [N(t-1) + R(t) + k_g G(t-1)] \quad (10)$$

donde kn es un parámetro de escorrentía pluvial adimensional. El almacenamiento superficial en la red de drenaje tiene un almacenamiento igual a $N(t)$ donde:

$$N(t) = (1 - kn) [N(t-1) + R(t) + k_g G(t-1)] \quad (11)$$

La primera modificación realizada a este modelo es considerar la superficie nival para dividir la precipitación media de la cuenca $P(t)$, se considera que existe precipitación líquida solo fuera de esta superficie y por lo tanto la precipitación efectiva se transforma en:

$$P_e(t) = P(t) \left(1 - \frac{A_{nival}}{A_{cuenca}} \right) + P_s(t), \text{ si } T > 0 \quad (12)$$

En el caso que la temperatura sea menor que cero, entonces no existe derretimiento $P_s(t)$ y se mantiene la ponderación de áreas. El área nival se obtiene en base a la curva hipsométrica de la cuenca y la altura de la isoterma de congelación o precipitación sólida. La máxima humedad permitida en la zona no saturada, se calcula con el método de curva número, reemplazando por el menor valor posible de curva número CN_1 .

$$S_{max} = \frac{25400}{CN_1} - 254 \quad (13)$$

Sin embargo, se realizó una modificación a la ecuación (13), ya que, la percolación no se produce solo cuando la humedad del suelo sobrepasa este valor, sino a un valor

menor debido al movimiento descendente del agua producto de la diferencia de energía. Con lo cual, (13) se ajusta por un coeficiente $\alpha \leq 1$, que corresponde a otro de los parámetros del modelo.

$$S_{max} = \alpha \left(\frac{25400}{CN_1} - 254 \right) \quad (14)$$

Además, se modifica el almacenamiento nival considerando su superficie. Las ecuaciones son:

$$Snow(t) = Snow(t-1) + P(t) \frac{A_{nival}(T)}{A_{cuenca}} - P_s \quad (15)$$

$$\hat{P}_s(t) = \begin{cases} M(T - T_b), & T > T_b \\ 0, & T \leq T_b \end{cases} \quad (16)$$

donde M es un parámetro de derretimiento de nieve en $mm/^\circ C$.

$$P_s(t) = \begin{cases} \hat{P}_s(t), & Snow(t-1) + P(t) \frac{A_{nival}(T)}{A_{cuenca}} - \hat{P}_s > 0 \\ Snow(t-1) + P(t) \frac{A_{nival}(T)}{A_{cuenca}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (17)$$

Donde \hat{P}_s es el derretimiento potencial y T_b es la temperatura base del método grado-día. La percolación es calculada primero obteniendo la humedad total que debiera almacenarse si no existiera otro almacenamiento subterráneo, $SS(t) = S(t) + I(t)$, y luego en base a (18).

$$Perc(t) = \begin{cases} SS(t) - S_{max} + k_s S(t-1), & \text{si } SS(t) > S_{max} \\ k_s S(t-1), & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (18)$$

Donde k_s es el coeficiente que permite que exista percolación durante todos los meses a pesar que no se supere el S_{max} .

Resultados

para la generación de la precipitación en la cuencas se utilizan patrones de distribución espacial de precipitación media mensual estimados previamente a través de métodos geoestadísticos (*Co-kriging*). La serie de tiempo de precipitación en toda la cuenca se realiza considerando

una proporción directa con la estación base, es decir, se analiza la proporción que existe entre el patrón de cada mes y el promedio mensual de la estación base, y se aplica este mismo coeficiente para amplificar o disminuir el valor medio de la cuenca según corresponda.

La evapotranspiración potencial estimada en base a la ecuación de Hargreaves y Samani (1985) se consideró constante entre años. Sin embargo, frente a la posible variación que se produce por la desviación que se presenta entre el mismo mes de distintos años, se analizó la variación que se presenta al considerar la desviación estándar de las temperaturas y se concluyó que dado que se trabaja con valores medios mensuales, esta desviación no era importante y no afectaba sustancialmente la evapotranspiración potencial entre años.

El valor de curva número promedio de la cuenca se obtiene considerando información de textura de suelo en conjunto con el uso de suelo disponible, dando como resultado $CN = 60.5$. La temperatura media de la cuenca para toda la serie de tiempo, se obtiene realizando una comparación, para todos los meses, entre la estación base y la temperatura media mensual de la estación. La diferencia que se produce entre éstas, es asumida como constante para toda la cuenca, al igual que en la precipitación areal.

Modelación

El resultado de los parámetros se ha obtenido de un proceso de calibración de 10 años y los siguientes 10 años se utilizaron para realizar la validación (Figuras 3 y 4). Los valores medios de un ciclo anual se muestran en la Figura 5.

Las condiciones iniciales se consideraron como el promedio de cada almacenamiento del mes de marzo, por esta razón, estos son presentados como resultados (Tabla 5).

Tabla 5: Resumen de parámetros y condiciones iniciales.

Parámetros		Condiciones iniciales, mm	
k_g	1.056	S inicial	138
kn	0.527	G inicial	4
k_s	0.016	N inicial	11
M	5.861	Snow inicial	0
T_b	0.355		
α	0.513		

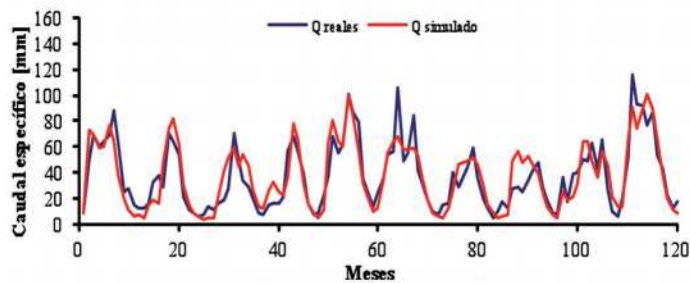


Figura 3: Etapa de calibración del modelo

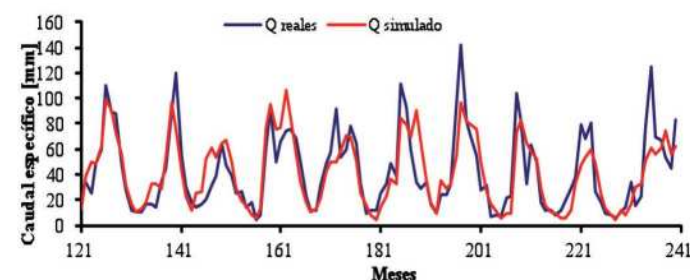


Figura 4: Etapa de validación del modelo

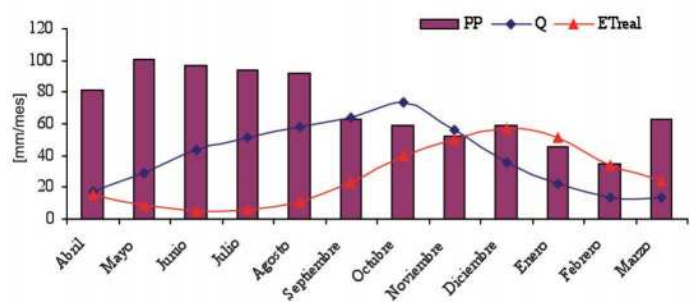


Figura 5: Ciclo medio anual de las entradas y salidas a la cuenca

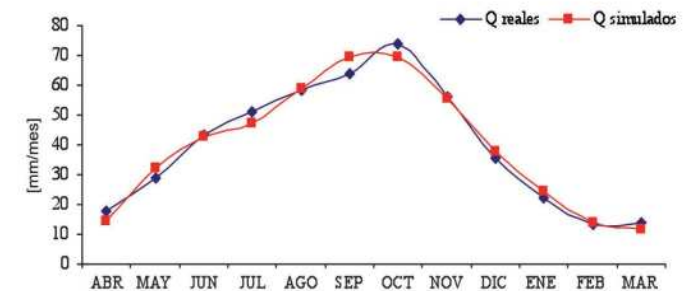


Figura 6: Comparación entre caudales medios mensuales reales y simulados

Tabla 6: Balance Hídrico Anual simplificado desde 1961 hasta 2001

Periodo	Precipitaciones mm	Escorrentía mm	Evapotranspiración Real mm	Evaporación mm	PP-Q-ETR mm	Error %
1962/1981	1458	884	440	2,57	131.43	-9.0%
1982/2001	839.3	478.6	325.2	-	35.5	-4.2%

Tabla 7: Balance Hídrico Anual completo desde 1981/1982 hasta 2000/2001

Precip. mm	Escorr. mm	ETR mm	PP -Q-ETR	Sub sup. mm	Superf. mm	Subterr. mm	Nieve mm	$\Delta S + \Delta N +$ $\Delta G + \Delta Nieve$	error mm	error %
839.30	478.62	325.21	35.47	0.88	2.40	1.81	0.00	5.09	-30.38	-3.62

Tabla 8: Resumen del Balance Hídrico Mensual promedio 1981/1982 hasta 2000/2001

Mes	PP mm	Q mm	ETR mm	S mm	N mm	G mm	Nieve mm	error mm	error %
Abril	81.00	17.58	15.30	175.40	12.76	7.85	0.00	1.19	1.47
Mayo	100.40	29.10	8.95	195.22	28.92	28.32	0.00	-5.90	-5.88
Junio	96.60	43.23	5.21	199.59	38.26	33.69	26.57	-2.49	-2.58
Julio	94.00	50.95	5.59	199.08	42.36	28.75	65.95	0.58	0.61
Agosto	91.50	58.26	11.11	193.58	52.75	44.23	64.05	-3.68	-4.02
Septiembre	63.30	63.69	23.62	181.24	62.31	37.32	40.92	-8.80	-13.91
Octubre	59.00	74.02	39.59	165.66	62.09	29.57	11.83	1.98	3.35
Noviembre	51.80	56.24	50.00	152.10	50.04	8.89	1.55	-2.12	-4.10
Diciembre	58.60	35.79	56.74	133.79	33.97	6.43	0.00	-4.47	-7.63
Enero	45.70	22.45	50.81	117.81	21.77	3.11	0.00	-3.93	-8.59
Febrero	34.90	13.56	33.95	113.38	12.63	1.70	0.00	-2.38	-6.83
Marzo	62.50	13.75	24.32	138.24	10.58	3.48	0.00	0.16	0.26

Balance hídrico

Una vez aplicado el modelo es posible obtener el balance hídrico anual y representar el promedio mensual de las variables del balance, que se muestra en las Tablas 6 y 7. Ahora, realizando el balance hídrico anual completo, que considera la variación de los almacenamientos, se obtiene un aporte de 5.09 mm de estos, lo cual valida el supuesto tradicional de considerarlos despreciables.

El resumen del balance hídrico mensual se encuentra en la Tabla 8, donde se han utilizado las siguientes abreviaciones: precipitación PP, escorrentía Q, evapotranspiración real ETR, almacenamiento subsuperficial o no saturado S, almacenamiento superficial N, almacenamiento subterráneo o saturado G y almacenamiento nival (Nieve). En este balance se presentan los valores promedios mensuales de cada variable y el error promedio mensual del balance de los 240 meses considerados.

Discusión

La calidad de la información utilizada y la forma en como se utilizan los datos, puede de una u otra forma afectar los resultados de la modelación. Por esta razón es importante tener presente las limitaciones o simplificaciones utilizadas. En este caso las principales se encuentran asociadas al punto de vista simplificado en el cual la precipitación y la temperatura se expandieron hacia la cuenca. El uso de estaciones patrones para extrapolar la realidad de la cuenca a través de planos de isoyetas e isothermas medias puede no ser siempre muy representativo. En el caso de la precipitación puede alejarse considerablemente para eventos extremos, y para las isothermas el efecto del viento puede trasladar masas de aire afectando al gradiente térmico y por ende a la evapotranspiración. Sin embargo, la escasez de datos en una zona tan extensa (solo 4 estaciones pluviométricas y 3 fluviométricas dentro de una cuenca



de 3972 km²) y la extensión de periodo de modelación impiden una mejor estimación.

Al analizar los caudales simulados y reales en las Figuras 3, 4, 5 y 6 es posible observar que el modelo no predice completamente los caudales máximos, lo cual puede ser atribuido a la existencia de eventos de precipitación que se escapan de los supuestos planteados. En general muchos fenómenos pueden inducir este tipo de errores o simplemente puede ser asumido directamente a que el modelo no es capaz de capturar todos los fenómenos que se encuentran integrados en una cuenca, de cualquier modo los estadígrafos obtenidos en la calibración se consideraron adecuados (coeficiente de correlación de 0.88 y error cuadrático medio de 1.13 mm) y en la etapa de validación (coeficiente de correlación de 0.83 y error cuadrático medio de 1.56 mm). Al realizar un análisis de residuales se obtiene una media de -0.11 mm, coeficiente de asimetría de -0.34 y una curtosis de 2.20, valores que son muy cercanos a una distribución normal por lo que el modelo se considera satisfactorio.

Al realizar la comparación entre el balance hídrico anual desde 1981/1982 hasta 2000/2001 y el balance anterior desde 1961/1980, se aprecia una gran diferencia en cuanto a la precipitación media areal y escorrentía. En el caso de la precipitación, al realizar una comparación entre la información utilizada en el balance anterior para las 3 estaciones insertas en la cuenca, se tiene una disminución de -14% en Coyhaique Alto, en Balmaceda en un -33% y en Coyhaique Escuela Agrícola en un -21%, a su vez al analizar la escorrentía el valor promedio anual actual es de 476.9 mm/año en cambio el valor anterior corresponde a 884 mm/año. Sin embargo se encontró que la estimación del área de la cuenca en el balance anterior se encuentra subestimada en un 8%, lo cual aumentaría su escorrentía específica, no obstante este error no soluciona substancialmente la discrepancia entre ambas escorrentías. Más aún, al comparar los caudales medios mensuales en la estación de Coyhaique bajo junta Coyhaique (Figura 7), se aprecia que existe una clara disminución de los caudales entre ambos balances.

Ahora, si se realiza una comparación entre el balance hídrico simplificado y el completo para nuestro periodo de estudio, es posible observar que el supuesto de considerar la variación de los almacenamientos igual a cero, es

totalmente factible y adecuado en el caso de ser necesario, ya que la discrepancia entre ambos errores es aproximadamente 5 mm. En cuanto a la disponibilidad de agua es posible mencionar que la cuenca presenta 4 meses con déficit hídrico y 6 meses con exceso de agua. Además, es de carácter subhúmedo, ya que el período del año en que el suministro de humedad aprovechable del suelo alimentado por la lluvia es mayor que la mitad de la evapotranspiración de referencia, corresponde a 240 días (CAZALAC, 2004).

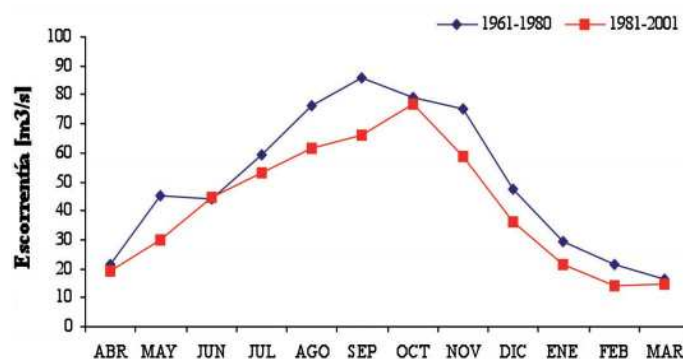


Figura 7: Comparación de escorrentía entre balance hídrico para la estación de Simpson bajo junta Coyhaique

Conclusiones

Del balance hídrico, se tiene que la precipitación media anual es de 839.3 mm/año, la escorrentía es de 478.6 mm/año y la evapotranspiración real es de 325.2 mm/año, lo cual arroja un error de cierre de -35.5 mm/año, en el caso del balance anterior (1961-1980) el error de cierre fue de 131.4 mm/año. De aquí se observa que la utilización de metodologías más modernas mejora considerablemente el error de cierre, casi 100 mm/año de diferencia y una disminución a la mitad del error porcentual, además de tener la facilidad de determinar cada una de las variables en forma independiente lo que minimiza la trasmisión de errores entre variables. La disponibilidad de agua en la cuenca del río Simpson es de 40.648 m³/año/por persona, lo cual sitúa la cuenca a la altura de valores de la región de la Araucanía y muy por debajo de los valores medios de la región de Aysén, 3.362.822 m³/año/por persona, lo cual hace de la cuenca, a pesar de la diferencia, muy propensa a desarrollarse sin limitaciones hídricas.

Al comparar las magnitudes de los componentes del balance actual y anterior, se encontró una disminución de 42.4 % en la precipitación y de 45.9% en la escorrentía, lo que podría ser asumida como error en la estimación de alguno de los balances. Sin embargo, si se analiza las productividades hídricas por unidad de precipitación, se tiene en el balance anterior 0.61 mm/mm y en el actual 0.57 mm/mm, lo cual desecha la posibilidad de un error grosero en algunos de los balance. Por otro lado, al analizar la metodología empleada en el balance realizado por la DGA (1987), se tiene que probablemente las isoyetas creadas sobrestimen la precipitación producto de la escasez de estaciones en el periodo en estudio y la no consideración del marcado gradiente de precipitaciones de Oeste a Este, lo cual permitiría que las variaciones entre los balances no fuesen tan marcadas. En el futuro, con el fin de eliminar posibles diferencias, se debiera realizar en forma periódica estos balances y a través de metodologías estandarizadas, ya que con solo dos balances realizados y metodologías muy distintas es difícil determinar fehacientemente si es que existen problemas en la determinación del balance o existen cambios en el comportamiento de la cuenca en estudio. En conclusión sin esta modelación, variables como evapotranspiración real no hubiesen sido posibles de obtener sin la necesidad de utilizar fórmulas empíricas, determinar características de la sensibilidad de la cuenca ante cambios naturales o producto del hombre, hubiesen estado muy lejanas de realizar, por lo tanto, todos los resultados expuestos en este trabajo reafirman la utilidad de la modelación para permitir abordar realidades complejas de cualquier fenómeno y manipularlo para estudiar su comportamiento.

Agradecimientos

Se agradece al Proyecto Fondecyt N° 1050576 “Efectos geológicos y ambientales de la dinámica geomorfológico e hidrológica de la hoya del río Aysén” y también la Dirección General de Aguas, DGA Chile, por proporcionar la información con que se desarrolló la investigación.

Referencias

CAZALAC (2004). Guía Metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. Centro del Agua para Zonas Áridas

y Semiáridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC), 66p.

Coutu, S., Giudice, D.D., Rossi, L. and Barry, D.A. (2012). Parsimonious hydrological modeling of urban sewer and river catchments. *Journal of Hydrology* 464–465, 477-484.

DGA (1987). Balance Hídrico de Chile. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

DGA (2004). Cuenca del Río Aysén. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Chile. Realizado por CADE-IDEPE.

Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2), 96-99

Limbrunner, J.R., Vogel, R.M. and Chapra, S. (2005). A Parsimonious Watershed Model. In *Watershed Models*, Singh, V.P. and Frevert, D.K editors, CRC Press, 549-567.

Orellana, B., Pechlivanidis, I.G., McIntyre, N., Wheeler, H.S. and Wagener, T. (2008). A Toolbox for the Identification of Parsimonious Semi-Distributed Rainfall-Runoff Models: Application to the Upper Lee Catchment. *International Congress on Environmental Modelling and Software Integrating Sciences and Information Technology for Environmental Assessment and Decision Making*, Barcelona, Spain.

Pande S., Savenije, H. G., Bastidas, H. G. and Gosain, A.K. (2011). A Parsimonious Hydrological Model for a Data Scarce Dryland Region. *Water Resource Management*, 26(4), 909-926

Sokolov, A. y Chapman, T. (1981). Métodos de Cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de investigación y métodos. Instituto de Hidrología de España – UNESCO

Teuscher, H., Adler, R. y Seaton, J. (1985). El suelo y su fertilidad. Editorial Continental. México.

UNESCO-IMTA (2006). Evaluación de Recurso Hídricos. Elaboración de Balances Hídricos por cuencas hidrográficas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.

Xu, C.Y. and Singh, V.P. (1998). A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations. *Water Resources Management* 12, 31–50.

Parameter uncertainty methods in evaluating a lumped hydrological model

Método de incertidumbre paramétrica en la evaluación de un modelo hidrológico agregado

Fecha de entrega: 8 de octubre 2012

Fecha de aceptación: 12 de diciembre 2012

Jairo Diaz-Ramirez, Rene Camacho, William McAnally and James Martin

Department of Civil and Environmental Engineering, Mississippi State University, 501 Hardy Road, 235 Walker Engineering Bldg., Box 9546, Mississippi 39762-9546, USA, jd216@cee.msstate.edu, rac333@cee.msstate.edu, mcanally@cee.msstate.edu, jmartin@cee.msstate.edu

Water resources modelers face the challenge of dealing with numerous uncertainties due to the lack of knowledge of the natural systems, numerical approaches used in modeling (equations, parameters, structures, solutions), and field data collected to set up and evaluate models. Propagation of parameter uncertainty into model results is a relevant topic in environmental hydrology. Uncertainty analyses improve assessment of hydrological modeling. There is a need in modern hydrology of developing and testing uncertainty analysis methods that support hydrological model evaluation. In this research the propagation of model parameter uncertainty into streamflow model results is evaluated. The Hydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF) supported by the US Environmental Protection Agency was evaluated using hydroenvironmental data from the Luxapallila Creek watershed located in Mississippi and Alabama, USA. The uncertainty bounds of model outputs were computed using the Monte Carlo simulation and Harr's point estimation methods. Analysis of parameter uncertainty propagation on streamflow simulations from 12 HSPF parameters was accomplished using 5,000 Monte Carlo random samples and 24 Harr selected points for each selected parameter. The comparison showed that Harr's method could be an appropriate initial indicator of parameter uncertainty propagation on streamflow simulations, particularly for hydrology models with several parameters.

Keywords: HSPF, parameter uncertainty, Monte Carlo simulation, Harr's point estimation method, uncertainty bounds of streamflow simulations

Los modeladores de recursos hídricos enfrentan el desafío de trabajar con diferentes tipos de incertidumbre debido a la falta de un completo conocimiento de los sistemas naturales, procesos de modelación, aproximaciones numéricas (ecuaciones, parámetros, estructuras, soluciones), y datos de terreno tomados para desarrollar y evaluar modelos. La propagación de la incertidumbre paramétrica en los resultados de las simulaciones es un tópico relevante en la hidrología ambiental. Los análisis de incertidumbre mejoran la evaluación en el modelamiento hidrológico. Existe una necesidad en la hidrología moderna de desarrollar y evaluar métodos de análisis de incertidumbre que apoyen la evaluación de los modelos hidrológicos. En esta investigación se evaluó la propagación de la incertidumbre de los parámetros de un modelo en los resultados del flujo simulado. Un programa de simulación hidrológico HSPF patrocinado por la Agencia Ambiental de los EE.UU., fue evaluado utilizando datos hidroambientales de la cuenca de la quebrada Luxapallila localizada en los estados de Misisipi y Alabama, EE.UU. Los límites de incertidumbre de las salidas del modelo fueron calculados utilizando los métodos de simulación Monte Carlo y el método probabilístico de estimación puntual de Harr. El análisis de la propagación de la incertidumbre paramétrica en simulaciones de caudales con HSPF utilizando 12 parámetros fue realizada con 5000 muestras aleatorias de Monte Carlo y 24 puntos seleccionados de Harr para cada parámetro evaluado. La comparación mostró que el método de Harr podría ser un indicador inicial apropiado de la propagación de la incertidumbre paramétrica en simulaciones de caudales, particularmente en modelos hidrológicos con varios parámetros.

Palabras clave: HSPF, incertidumbre paramétrica, simulación Monte Carlo, método de estimación puntual de Harr, límites de incertidumbre de simulaciones de caudales

Introduction

Hydrologic models are represented by a series of input data (e.g. precipitation and evaporation), parameters (e.g. soil, land use, and channel properties), and structure (e.g. black-box, conceptual, physically based, grid, and lumped models). Every component of hydrologic models depicts uncertainty due to the lack of knowledge about real systems. Uncertainty in input data is due to natural variability, measurement inaccuracy, and errors in handling and processing data (Melching, 1995). Model parameters and structure show uncertainty due to model assumptions and approximations, scale effects, and variability of inputs and parameters in time and space (Gupta *et al.*, 2005; Tung, 1996). The uncertainty of input data on model results has been studied separately from model parameter uncertainty (Souid, 1999). Georgakakos *et al.* (2004) pointed out that few studies have investigated model structure uncertainty. Butts *et al.* (2004) declared that uncertainty evaluation is compensated among components (input data, model parameters, and model structure) because they are strongly interlinked.

The identification, quantification, and reporting of the different sources of errors in a modeling process constitute an uncertainty analysis (McIntyre *et al.*, 2002; Refsgaard and Henriksen 2004; Refsgaard *et al.*, 2007). Uncertainty analysis has received considerable attention during the last two decades by the water resources community. In hydrological modeling, important progress has been observed in the identification and understanding of the different sources of uncertainty, as well as in the incorporation of strategies for their quantification (e.g. Butts *et al.*, 2004; Georgakakos *et al.*, 2004; Wagener *et al.*, 2003). Uncertainty analysis of computer-based models is a valuable tool to do the following: understand the inability of a model to accurately and precisely depict the real world; enhance the value of information reported; distinguish between bias and precision error; calculate the precision limit of results; identify which components are most and least important; determine where to place more effort/resources to decrease the total uncertainty of the output; re-build a model; understand model limitations and strengths; calculate statistical properties of a model output; determine reliability analysis; and compare and choose between models (Morgan and Henrion, 1990;

Tung, 1996; Tung and Yen, 2005).

Techniques applicable for evaluating error propagation from different sources on hydrology model results can be classified in three groups: first-order methods (Melching, 1992, 1995; Zhang and Yu, 2004); probabilistic point estimate methods (Harr, 1989; Rosenblueth, 1975; Tung and Yen, 2005; Yu *et al.*, 2001); and Monte Carlo based methods such as Bayesian analysis, Markov Chain Monte Carlo, and the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation method (Beven and Binley, 1992; Dilks *et al.* 1992; Thiemann *et al.*, 2001). Applications and comparisons of these techniques on hydrology models can be found in Rogers *et al.* (1985), Binley *et al.* (1991), Melching (1995), and Yu *et al.* (2001). In general, these studies assumed that the results of the Monte Carlo method were most reliable when estimations from other uncertainty methods were compared. The Monte Carlo simulation is the best known and simplest way of sampling the entire range of likely observations of the system being studied (Morgan and Henrion, 1990). Most of the first-order and probabilistic point estimate methods are more computationally efficient than the Monte Carlo method. Melching (1995) pointed out that “research is needed to define strengths and weaknesses of applying these methods to computer models of watershed hydrology.”

Numerous real world hydrologic models exist, e.g. continuous or event based, distributed or lumped parameters, and empirical or physical equations (Singh, 1995; Singh and Woolhiser, 2002; Singh and Frevert, 2002). Currently many continuous hydrologic models are set up in conjunction with Geographical Information Systems GIS. In 1996, the US Environmental Protection Agency EPA released the Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources – BASINS, which links the Hydrological Simulation Program – FORTRAN HSPF (Bicknell *et al.*, 2001) and other watershed and water quality models with a GIS software, MapWindow (USEPA, 2011). Also BASINS incorporates an extensive U.S. data base (i.e. land use, climatological and water quality data) graphical and statistical analysis, and reporting tools. The HSPF software is a continuous, reservoir-type, semi-distributed parameter model supported by the USEPA. The HSPF model is one of the most comprehensive, flexible and modular programs of watershed hydrology and water

quality available (Donigian *et al.*, 1995). HSPF has been applied in different zones around the world since the 1980's (Diaz-Ramirez *et al.*, 2008, 2011; Donigian *et al.*, 1995; Singh and Woolhiser, 2002). Applications of HSPF in watersheds in the southeastern United States can be found in Alarcon *et al.* (2009), Diaz-Ramirez *et al.* (2011), and Duan *et al.* (2008). These studies mainly analyzed hydrological processes on the Luxapallila Creek watershed (Alabama and Mississippi), Saint Louis Bay watershed (Mississippi), Fish River watershed (Alabama), and the Mobile Bay basin (Alabama, Mississippi, Tennessee, and Georgia).

The main goal of this study is to evaluate two uncertainty methods, the Monte Carlo method and Harr's probabilistic point estimate method, in propagating HSPF parameter uncertainty into daily streamflow model results. Physical data from the Luxapallila Creek watershed are used to set up the HSPF model. This watershed is located in Alabama and Mississippi, USA. U.S. Geological Survey USGS streamflow data collected at the watershed outlet from 01/01/2002 to 12/31/2005 were used to evaluate model results.

The HSPF model

The Hydrological Simulation Program – FORTRAN HSPF model (Bicknell *et al.*, 2001) computes the movement of water through a complete hydrologic cycle – precipitation (rain/snow), evapotranspiration, runoff, infiltration, and flow through the ground – and the associated transport of constituents with that flow. It represents a watershed as a collection of land segments and channels (reaches). The land segments, either pervious or impervious, are connected to other land segments or to channel reaches, which can function as either streams or reservoirs. Rainfall is computed over the entire watershed and runs off land segments and reaches. Pervious land segments also store water in the plant canopy, on the surface, and in the soil, from which it can percolate into groundwater or flow down slope as interflow. Water in the plant canopy, surface, and surface soil layers can be lost to evapotranspiration. Water in reaches can be lost to evaporation, but not to groundwater. Water can flow from a land segment to a reach or to another land segment. Water in a reach must

either be stored there or flow into another reach; it cannot flow onto land except by irrigation. Table 1 describes HSPF parameters and their ranges related to hydrology in areas without snow. The current HSPF application is in the Luxapallila Creek watershed, Alabama/Mississippi where climate is classified as humid subtropical. The most probable HSPF values in the Luxapallila Creek watershed were extracted from an 18-year (1985-2003) model evaluation performed by McAnally *et al.* (2006). The model tested by McAnally *et al.* (2006) was manually calibrated using guidelines provided by HSPF developers (USEPA, 2012) and explained more than 72% of the daily variability of streamflows. Coefficient of determination R^2 and Nash-Sutcliffe NS statistics were good on daily ($R^2 = 0.72$ and $NS = 0.72$) and monthly ($R^2 = 0.84$ and $NS = 0.84$) periods. The model was evaluated under a large range of streamflows (0.8 m³/s to 566 m³/s). Table 1 also shows the impact of each HSPF parameter on modeling hydrologic processes. The impact of every HSPF parameter on hydrologic processes is based on guidelines provided by HSPF developers (USEPA, 2012). These guidelines provide advice on which parameter to modify, and in what direction, in order to accomplish a particular hydrologic process evaluation (water balance, high/low flow distribution, storm flow, and seasonal discrepancies).

The HSPF model also computes the transport and kinetics of multiple water quality constituents, including temperature, sediment, nutrients, and pesticides. As such, it presents a nearly complete package for modeling hydrology and water quality of a watershed. A more complete description of features and capabilities can be found in the HSPF user's manual (Bicknell *et al.*, 2001). Some versions of HSPF can be run in standalone mode, but the EPA-supported version is run through a BASINS interface, WinHSPF (USEPA, 2011). The rainfall-runoff model HSPF requires specific inputs that BASINS can generate. Watershed delineation tools within BASINS enable the user to automatically or manually generate a watershed drainage network and sub-networks, each consisting of land segments and receiving water reaches.

The literature review reports several deterministic applications of the HSPF model (Moore *et al.*, 1988; Laroche *et al.*, 1996; Al-Abed and Whiteley, 2002; Hayashi *et al.*, 2004; Albek *et al.*, 2004; Nasr *et al.*, 2007; Diaz-

Table 1: HSPF parameter definition and range (USEPA, 2000); most probable value for Luxapallila Creek watershed simulations (McAnally *et al.*, 2006); and hydrologic processes impacted by each parameter marked with X (USEPA, 2012)

Name	Definition	Range	most probable value	Hydrologic Process			
				water balance	high/low flow distribution	storm flow	seasonal discrepancies
LZSN mm	Lower zone nominal soil moisture storage	50.8 -381.0	228.6	X			
INFILT mm/hr	Index to infiltration capacity	0.025 – 12.7	2.8	X	X	X	
KVARY l/mm	Variable groundwater recession	0.0 – 127.0	45.7				X
AGWRC	Base groundwater recession	0.92 - 0.999	0.997		X		
DEEPR	Fraction of groundwater inflow to deep recharge	0.0 - 0.5	0.2	X	X		
BASETP	Fraction of remaining evapotranspiration from baseflow	0.0 - 0.2	0.04		X		X
AGWETP	Fraction of remaining evapotranspiration from active groundwater	0.0 - 0.2	0.025				X
CEPSC mm	Interception storage capacity	0.0 – 10.2	3.8				X
UZSN mm	Upper zone nominal soil moisture storage	1.27 – 50.8	27.9				X
INTFW	Interflow inflow parameter	1.0 - 10.0	3.0			X	
IRC	Interflow recession parameter	0.3 - 0.85	0.6			X	
LZETP	Lower zone evapotranspiration parameter	0.0 - 0.9	0.1	X			X

Ramirez *et al.*, 2008); however few applications attempt to quantify propagation of parameter, input data, and/or structure uncertainty into model results. Paul (2003) evaluated the effect of parameter uncertainty in the HSPF model to predict in-stream bacterial concentrations using First Order Analysis FOA techniques. He evaluated 10 water quality parameters from pervious and impervious areas and three in-stream water quality parameters. However, he did not evaluate the uncertainty effects of hydrologic/hydraulic parameters on modeling fecal coliform and assumed that the hydrology and hydraulic of the model were well calibrated. Paul (2003) pointed out that water quality parameters from pervious and impervious areas carried on most of the parameter uncertainty in simulated in-stream bacterial concentrations. In particular, the maximum storage of bacteria on pervious land surface parameter contributed with 99.86% of the variance in simulated peak in-stream concentration of fecal coliform

concentration in-stream. The contribution of the three in-stream water quality parameters to the output variance was negligible (0.12%). In addition, he recommended further research to evaluate the effects of hydrology and hydraulic processes on in-stream fecal coliform simulations.

Jia (2004) investigated parameter uncertainties in the HSPF model applying the generalized likelihood uncertainty estimation GLUE approach. A Latin hypercube sampling technique was used to generate random multiple parameter sets. The GLUE method introduced by Beven and Binley (1992) is a Monte Carlo based strategy for evaluation of parametric uncertainty. GLUE accepts multiple sets of parameter values as equal likely representations of a physical system. Other sources of uncertainty such as model structure and input data are treated implicitly within the GLUE framework. Unlike the formal methods for Bayesian inference, GLUE uses “informal” likelihood functions which are formulated without considering the

structure of the residuals between the observations and the model simulations of a given state variable. Therefore, any measure of goodness of fit such as the Nash and Sutcliffe efficiency criterion, or the total sum of the errors can be implemented in the GLUE methodology (Beven and Binley 1992). Jia (2004) evaluated seven hydrologic parameters at the watershed outlet (*i.e.* LZSN, INFILT, AGWRC, DEEPFR, UZSN, and IRC). After 50000 HSPF runs, many acceptable parameter sets were identified by the GLUE approach. Information on the total runoff distribution was not available, and wide variations of the total runoff (*i.e.* surface runoff, interflow, and baseflow) were acceptable.

Wu (2004) assessed the propagation of parameter uncertainty in both HSPF and CE-QUAL-W2 models using First-Order Error Analysis FOEA. He pointed out that the uncertainty in parameters related to streamflow generation was the main source of variance in simulated nutrient loads. However, when simulated nutrient concentrations were analyzed, some parameters related to hydrology processes have no significant effect. The author justified this difference by the non-linear relationship between pollutant loads and their concentrations. So, FOEA may not be an appropriate method to analyze propagation of parameter uncertainty in complex models. Wu recommends more analysis between FOEA and Monte Carlo analysis.

Harr and Monte Carlo methods

Uncertainty analysis methods used in hydrology simulation can be arranged in three groups: first-order methods, probabilistic point estimation methods, and Monte Carlo based methods. In this study, the Harr probabilistic point method and Monte Carlo method are used to propagate parameter uncertainty into HSPF streamflow simulations. The concept of probability point estimate methods PPEMs was originated by Rosenblueth (1975). A PPEM propagates the parameter uncertainty by performing point estimations of the function without calculating the derivatives of the function (first-order methods). Selected point estimations of model parameters are calculated using statistical moments (typically the mean and variance) of the variables instead of computing the entire probability density function PDF of the model parameters (as performed by Monte Carlo simulations). Harr (1989) developed a PPEM using the principal component matrix theory. This method

considers the mean, standard deviation, and correlation of the parameters. The Harr method propagates the parameter uncertainty through model outputs by performing two point estimations of the parameter space. The correlation matrix of parameters, C , is decomposed as

$$C = e\lambda e^T \quad (1)$$

where e is the eigenvector matrix; λ is the diagonal eigenvalue matrix and e^T is the transpose of the eigenvector matrix. Thus, someone using Harr's method must generate the correlation matrix of selected parameters and then compute, using mathematical programs such as MATLAB, the eigenvector matrix and the diagonal eigenvalue matrix. The uncorrelated and standardized coordinates can be calculated by

$$x_i^+ = \mu + \sqrt{n} \sigma e_i \quad (2a)$$

$$x_i^- = \mu - \sqrt{n} \sigma e_i \quad (2b)$$

where μ is the vector of the expected values of the parameter; n is the number of parameters; σ is the diagonal matrix of the standard deviation of the parameters; and e_i is the eigenvalue λ_i . Finally, based on the two coordinates selected along each eigenvector (2a) and (2b), the user must compute the corresponding model output values. For instance, this research used 12 HSPF parameters; thus 24 coordinates were calculated and 24 model outputs were generated for each simulated day. Then, the 95th and 5th percentiles of these 24 model outputs were calculated to generate the 90% uncertainty bounds of model outputs using the percentile function in MATLAB. As a summary, the Harr method involves the following steps:

1. Identify model parameter ranges and sample values of each parameter;
2. verify the symmetry of each input parameter (if the distribution is not symmetric, the Harr method is not appropriate. However, parameter transformation could be performed to ensure input parameters are symmetric);
3. compute mean and standard deviation of each parameter;

4. calculate the correlation matrix of each parameter;
 5. determine eigenvectors from the correlation matrix;
 6. compute $2n$ coordinate points using equations (2a) and (2b);
 7. evaluate the model with parameter values computed in step 6;
 8. analyze the model outputs (percentiles, mean, standard deviation, etc).
4. repeat steps 2 and 3 many times; and
 5. analyze the model outputs (*e.g.*, CDF, percentiles, mean, standard deviation, *etc.*).

A drawback of the Harr method is that the uncorrelated and standardized coordinates may fall outside the parameter bounds (Christian and Baecher, 2002). In this study, when a coordinate was outside the pre-established HSPF parameter range, the closest parameter limit was used instead of the outside value. This issue can be related to poor definition of model parameter range. However, HSPF hydrologic algorithms have been tested since 1960 and model developers have developed a comprehensive list of parameter ranges (USEPA, 2000). An application of the Harr method in simulating watershed hydrology is found in Yu *et al.* (2001).

The Monte Carlo method computes an empirical probability distribution of the model output using random values for the input variables sampled from their probability distribution (Metropolis and Ulam, 1949). Detailed information on Monte Carlo simulation is found in Ronen (1988), Morgan and Henrion (1990), and Sobol' (1994). The Monte Carlo simulation is the best known uncertainty method, and the simplest way of sampling the entire range of likely observations of the system being studied (Morgan and Henrion, 1990). Melching (1995) declared that the Monte Carlo method “may be the only method that can estimate the cumulative density function CDF and PDF of Z (a model parameter) for cases with highly nonlinear and/or complex system relationships.” The Monte Carlo simulation involves five steps:

1. Generate probability distributions of selected model parameters (*e.g.*, normal, triangular, beta, *etc.*);
2. calculate a random value from the parameter's distributions;
3. evaluate the model using the random value calculated in step 2;

The Monte Carlo simulation has been applied to study the uncertainty of forcing input data and model parameters in computer models of watershed hydrology (Melching, 1995; Carpenter and Georgakakos, 2004). Melching (1995) stated that “for complex, nonlinear models with many uncertainty basic variables, however, the number of simulations (thus the computer time) necessary to achieve an accurate estimate may become prohibitive.” Increasing of computer processing speeds makes computations more tractable. Monte Carlo method results have been used as a baseline when comparisons with other uncertainty methods have been done (Binley *et al.*, 1991; Melching, 1992; Melching, 1995; Yu *et al.*, 2001).

In summary, the Harr method is computationally more efficient than the Monte Carlo method. In Harr's method, mean, standard deviation of parameters and their correlations are used to propagate parameter uncertainty into model results. The Harr method is limited to symmetrical distributions and sometimes the uncorrelated and standardized coordinates are calculated out of the parameter bounds. The computation algorithm of the Monte Carlo method has a simple structure and is used in complex and nonlinear models. In the Monte Carlo method, random parameter inputs are computed from their probability distributions and are then propagated through model results. The Monte Carlo method is computationally time consuming at high levels of accuracy.

Methodology Study area

This study used physical data from the Luxapallila Creek watershed located in the Southeastern of United States. The watershed flows through Fayette, Lamar, Marion, and Pickens counties in Alabama and into Lowndes and Monroe counties in Mississippi (Figure 1). Near the outlet (USGS Station 02443500), the watershed has a drainage area of 1.801 km², an average basin slope of 2%, and average annual precipitation (1982 - 2004) of 1.379 mm recorded at the Millport 2E weather station. Seasonal fluctuations in rainfall result in maximum river discharges

from January to April and minimum discharges from August to September. Elevation in the study area ranges from 45 to 274 m mean sea level. The USGS Geographic Information Retrieval and Analysis System GIRAS, states that land cover developed in the early 1980's is distributed as 73% forest land, 20% agricultural land, 6% wetlands, and 1% other land types (barren, urban, and non-urban). More information about the Luxapallila Creek watershed can be found at Diaz-Ramirez *et al.* (2011).

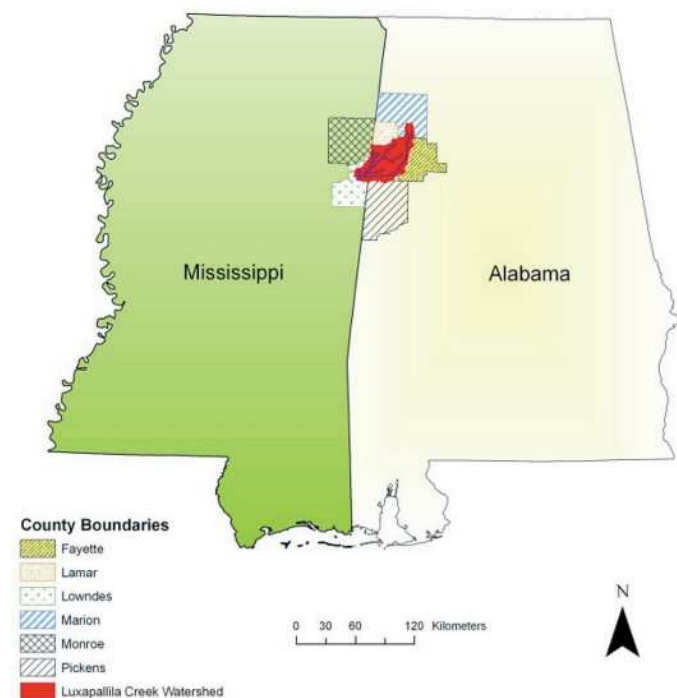


Figure 1: Location of the Luxapallila Creek watershed

HSPF model set up

The Luxapallila watershed model was set up with a standard set of procedures and data as might be used in any BASINS application to provide a HSPF input data file (uci file). Spatial and climatic time series databases, including land use, overland flow slope and length, reach characteristics, and detailed meteorological data are used as inputs to HSPF. The model was lumped using one basin area and one main channel because streamflow-gauging station data from only one station were available (USGS 2443500). Topographic data were created from the standard USGS Digital Elevation Models DEMs, and the DEMs were also used to delineate the watershed boundaries. The length and slope of overland flow and reach were calculated and kept constant throughout the simulations. Manning's *n* roughness coefficients for overland flows were determined

by literature review and were kept constant throughout the simulations. The watershed was partitioned into five pervious and one impervious land types (Table 2).

Table 2: Pervious and impervious land types simulated using 1980 GIRAS data

Land cover	Surface area km ²	Surface area %
Forest land	1316.9	73.1
Agricultural land	360.0	20.0
Barren land	2.5	0.1
Wetlands	104.4	5.8
Urban land (pervious)	8.1	0.4
Urban land (impervious)	8.1	0.4
Water	1.5	0.1

Hourly precipitation data were NEXRAD stage IV data from the Earth Observing Laboratory web page (<http://data.eol.ucar.edu/codiac/dss/id=21.093>). Downloaded rainfall data were uncompressed and incorporated into input files by use of the Watershed Data Management WDMUtil software (Hummel *et al.*, 2001). Hourly potential evapotranspiration, air temperature, dew point, wind speed, solar radiation, evaporation, and cloud cover values were obtained from the Haleyville station. The weather database for the Haleyville station was downloaded from the BASINS web site. The model was run for data from 01/01/2002 through 12/31/2005. The model time step was hourly, but streamflow data were output daily to compare with observed data (USGS Station 02443500).

Computational experiment

Monte Carlo method

The first step in the Monte Carlo simulation MCS was to determine the probability density functions PDFs for the input parameters considered in the study. In most studies this is performed by using a non-informative uniform distribution for each parameter, which covers a feasible range of parameter values for the particular study. Due to the lack of data to estimate the PDFs, all parameters were assigned a triangular distribution, which is defined by the lowest, most probable, and highest values. Most probable values were extracted from an 18-year model calibration of the Luxapallila Creek watershed (McAnally *et al.*, 2006), see Table 1. Highest and lowest values were

assigned based on the EPA BASINS Technical Note 6 (USEPA, 2000), also in Table 1. Haan (2002) pointed out that the accuracy of the Monte Carlo simulations is a function of the assumed PDF and number of simulations performed. In selecting PDFs and number of simulations, there is no defined answer and judgment is required to make these decisions (Haan, 2002). Authors believe that taking into consideration the calibrated parameters (most probable values) from a long term deterministic evaluation (McAnally *et al.*, 2006) in the study area will positively impact the Monte Carlo method results by forcing the parametric space search around the most probable values.

Five thousand random samples from the 12 HSPF parameter's distributions (triangular distributions) were generated using MATLAB. Then, the HSPF program was run using the selected random samples from 01/01/2002 to 12/31/2005. Finally, evaluation of streamflow simulations was accomplished (stability results, 95th and 5th percentiles) at daily levels with 5.000 streamflow simulations for each simulation day.

To determine the number of realizations (stability results) sufficient to analyze the uncertainty of streamflow simulations, the values of Absolute Relative Errors *ARE* of simulated daily flows were calculated as

$$ARE = \sum_{i=1}^N \left[\frac{|Q_{i+1} - Q_i|}{Q_i} \right] \quad (3)$$

where N is the number of Monte Carlo simulations; and Q_i is the simulated daily flow for run i . For instance, in this study, 1.096 daily HSPF streamflows from 01/01/2003 through 12/31/2005 were used; this means that 1.095 *ARE* results were calculated for each Monte Carlo simulation.

Harr method

The first step in the Harr method was to calculate the correlation matrix, mean, and standard deviation of the 12 HSPF parameters evaluated. The USEPA developed a database of HSPF model parameters (USEPA, 2006). This database was called HSPFParm and contains HSPF parameter values of several model applications in the U.S. Twenty seven sets of parameter values were used to compute the correlation matrix, mean, and standard deviation of selected parameters. Table 3 depicts mean,

standard deviation, median, mode, and skew values of selected HSPF parameters. In a symmetric distribution, the mean, median, and mode are the same (Haan, 2002). For each parameter in Table 3, it can be observed that these three statistically measured values are close and the skew values are around zero. This means that the assumption of symmetry for input distributions in the Harr's method is most likely valid in this study. Other uncertainties could arise in using the Harr's method. For example, the short sets of parameter values (only 27) and the lack of parameter values found in the study site or near watersheds. Table 4 shows the correlation matrix of selected HSPF parameters. Then, the eigenvector and eigenvalue matrices from the correlation matrix were calculated using MATLAB.

Table 3: Statistical measure values of selected HSPF parameters

Parameter	mean	standard deviation	median	mode	skew*
LZSN, mm	146.7	48.0	156.4	180.6	-0.6
INFILT, mm/hour	2.0	1.0	1.9	1.9	1.6
KVARY, 1/mm	24.3	25.4	24.8	0.0	0.5
AGWRC	0.97	0.02	0.98	0.99	-1.5
DEEPR	0.04	0.1	0.002	0.00	3.9
BASETP	0.02	0.02	0.02	0.00	1.5
AGWETP	0.02	0.04	0.02	0.00	2.1
CEPSC, mm	0.3	0.7	0.00	0.00	2.1
UZSN, mm	14.8	7.3	10.9	10.8	0.8
INTFW	2.9	1.7	2.7	2.7	1.7
IRC	0.7	0.2	0.8	0.8	-2.1
LZETP	0.3	0.3	0.3	0.0	0.5

* dimensionless

The model runs required to solve the system were 2 by the number of parameters. In this study, 12 parameters were evaluated; thus 24 model HSPF runs were required to solve the system. Using equations (2a) and (2b), the coordinates of the 24 intersection points by each HSPF parameter were calculated. Coordinate values out of range were changed by the closest limit value. Finally, using these 24 sets of parameters to determine the 95th and 5th percentiles of model outputs, the 90% uncertainty bounds (95th-5th percentiles) were calculated at daily levels from 01/01/2003 to 12/31/2005.

Performance evaluation

The overall effect of parameter uncertainty on streamflow

Table 4: Correlation matrix of selected HSPF parameters

	LZSN	INFILT	KVARY	AGWRC	DEEPFR	BASETP	AGWETP	CEPSC	UZSN	INTFW	IRC	LZETP
LZSN	1.0	0.1	0.6	-0.2	-0.1	0.2	0.3	0.0	0.4	0.1	-0.3	0.4
INFILT	0.1	1.0	0.1	0.2	0.5	-0.1	0.1	0.6	0.1	0.0	-0.2	0.3
KVARY	0.6	0.1	1.0	-0.3	0.0	0.3	0.5	-0.3	0.6	0.3	-0.2	0.6
AGWRC	-0.2	0.2	-0.3	1.0	0.1	-0.6	-0.2	0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.5
DEEPFR	-0.1	0.5	0.0	0.1	1.0	-0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.3	-0.2	0.0
BASETP	0.2	-0.1	0.3	-0.6	-0.1	1.0	0.7	0.2	0.0	-0.1	-0.2	0.2
AGWETP	0.3	0.1	0.5	-0.2	0.1	0.7	1.0	0.3	0.1	-0.1	-0.5	0.1
CEPSC	0.0	0.6	-0.3	0.1	0.0	0.2	0.3	1.0	0.0	-0.1	-0.5	0.0
UZSN	0.4	0.1	0.6	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0	1.0	0.4	-0.2	0.4
INTFW	0.1	0.0	0.3	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	0.4	1.0	0.2	0.6
IRC	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	-0.2	0.2	1.0	0.1
LZETP	0.4	0.3	0.6	-0.5	0.0	0.2	0.1	0.0	0.4	0.6	0.1	1.0

simulations was evaluated by computing the 5th and 95th percentiles (*i.e.* 90% uncertainty bounds) of the Monte Carlo and Harr results. Two criteria were used to evaluate the HSPF 90% uncertainty bounds:

- *Reliability*: the number or percentage of daily observed streamflows within the HSPF 90% uncertainty bounds;
- *Sharpness*: the width of the HSPF 90% uncertainty bounds (minimum, median, and maximum values).

The HSPF 90% confidence intervals were evaluated using daily observed flow data from 01/01/2003 to 12/31/2005 at the watershed outlet (USGS station 02443500). Three percentile classes of observed flows developed by the USGS (<http://water.usgs.gov/waterwatch/>) were calculated to find the effect of model *Reliability* to above normal (>75th percentile), normal (between 25th and 75th percentiles), and below normal flows (<25th percentile).

In addition to the *Reliability* and *Sharpness* criteria, continuous hydrographs of 90% uncertainty bounds and observed data were plotted. Scatterplots were drawn of 5th and 95th flow percentiles using the Monte Carlo and Harr scenarios. In this study, Monte Carlo simulations MCS were defined as benchmark. This method is widely considered as effective strategy for the evaluation of parametric uncertainty because the propagation of the parameter variability is performed using thousands of random numbers from the parameter distribution. On the other hand, the Harr method uses only 2 by the number of parameters to generate the uncertainty bounds. In Monte Carlo simulations, the computation of the sample size

is a key factor (Haan, 2002). In this study, Monte Carlo simulations were made with sample sizes up to 5.000 runs. Then, the Absolute Relative Errors *ARE* (3) of simulated daily flows and number of Monte Carlo simulations were evaluated to find where the errors converge to a particular value.

Evaluation of the Harr method was accomplished in the same form as the MCS scenario (calculating the 95th and 5th percentiles of model outputs, and *Reliability* and *Sharpness* criteria). To compare the Monte Carlo results versus the Harr results, the Relative Error of *Reliability* $RE_{Reliability}$ and *Sharpness* $RE_{Sharpness}$ criteria values were calculated as follows:

$$RE_{Reliability}(\%) = \frac{(Reliability)_{Harr} - (Reliability)_{Monte\ Carlo}}{(Reliability)_{Monte\ Carlo}} 100 \quad (4)$$

$$RE_{Sharpness}(\%) = \frac{(Sharpness)_{Harr} - (Sharpness)_{Monte\ Carlo}}{(Sharpness)_{Monte\ Carlo}} 100 \quad (5)$$

Results and discussion

Stability results of the Monte Carlo method

Figure 2 shows the relationship between *ARE* of simulated daily flows and number of MCS. Each line in Figure 2 represents one simulation day between 01/01/2003 and 12/31/2005. This figure reveals that the *ARE* values were close between runs 2.000 and 5.000. In general, higher MCS yielded lower *ARE* results. It can be seen that the slope of the *ARE* values is steep for MCS less than 1.000 runs and getting flat between 2.000 and 5.000 runs. The

median *ARE* values from 3.000 to 5.000 MCS were close ($5 \cdot 10^{-5}$ to $7 \cdot 10^{-5}$). It took approximately 12 hours of CPU time to produce 5.000 simulations of the Luxapallila watershed model (with 115 NEXRAD grid points, one hour time step, and time simulation between 01/01/2002 and 12/31/2005) using a desktop computer with a 3.06GHz Xeon(TM) CPU and 1.00 GB of RAM. Therefore, 5.000 MCS, a median *ARE* value of $7 \cdot 10^{-5}$, and 12 hours of CPU time were considered sufficient for the purpose of this research.

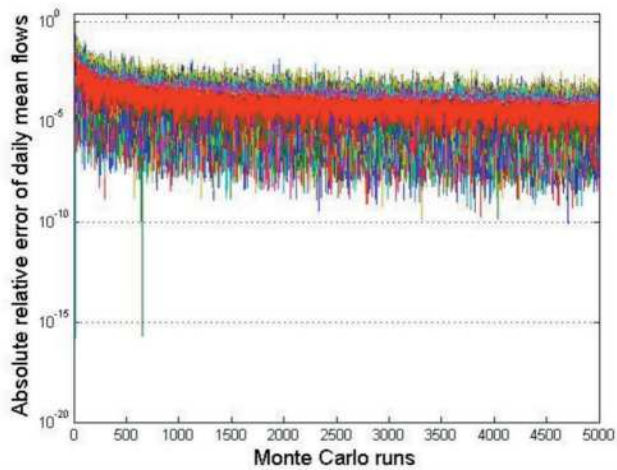


Figure 2: Stability of results using Monte Carlo method with Y-axis on a logarithmic scale

Uncertainty estimates

Results of parameter uncertainty propagation on HSPF model outputs using the Monte Carlo and Harr methods are shown in this section. Additionally, the Harr results were compared to the Monte Carlo results.

The Harr method used 24 simulations (two times the number of HSPF parameters) to solve the system, and normal distributions were used for the selected HSPF parameters. The baseline scenario using MCS used 5.000 interactions and triangular distributions to calculate the 90% uncertainty bounds.

Model *Reliability* results for the 2003-2005 period using the Monte Carlo and Harr methods were 65.4% and 72.7%, respectively. This means that the Harr method uncertainty bounds included 11% more observed daily flows than the 90% uncertainty bounds yielded by the MCS. Relative errors of model *Reliability* results by observed flow percentiles from the Monte Carlo and Harr methods are shown in Table 5. The lowest and highest relative errors

were -0.8% and 18.6%, respectively. Both uncertainty methods calculated close results for below normal flows. The Harr method consistently overestimated observed flows within the 90% uncertainty bounds for normal and above normal flows.

Table 5: Relative errors of model Reliability results by observed flow percentiles due to the Monte Carlo and Harr methods (2003-2005)

Observed flow percentiles	MCS %	Harr %	Relative error %
<25th	92.3	91.6	-0.8
25th-75th	60.2	71.4	18.6
>75th	48.2	55.8	15.9

Figure 3 displays 5th and 95th flow percentiles by the MCS and Harr methods. In general, high variability and a markedly high overestimation were shown by the Harr results.

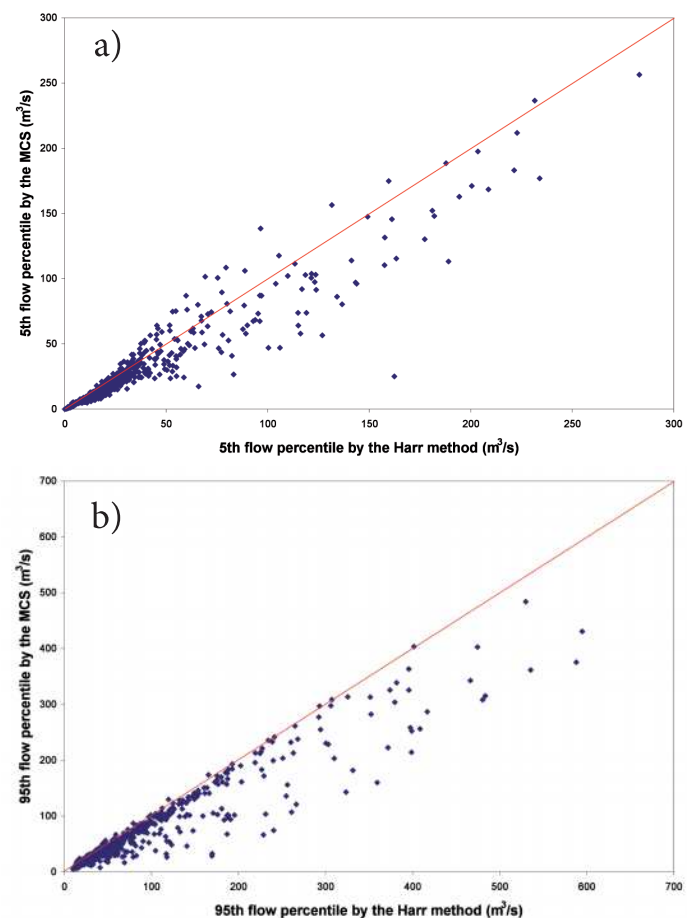


Figure 3: MCS and Harr methods (2003-2005), scatterplots of: a) 5th flow percentile and b) 95th flow percentile

Figure 4 shows comparisons of uncertainty bounds generated by the MCS and Harr methods for selected storms. The uncertainty bounds calculated by both methods significantly differ from one another. All of the uncertainty bounds for peak flows by the Harr method were wider and higher than those yielded by the MCS. Table 6 shows selected percentiles of the model *Sharpness* calculated using the Monte Carlo and Harr methods. Clearly, the Harr method results overestimated the width of the 90% uncertainty bounds (model *Sharpness*) for each percentile.

The minimum, median, and maximum relative errors of *Sharpness* criteria values between the MCS and Harr methods were -43.6%, 20.7%, and 563.6%, respectively. The higher model *Sharpness* calculated using the Harr method may be explained by the use of just 24 Harr runs rather than the 5,000 Monte Carlo runs. Additionally, the Harr method selected the parameter values using normal distributions of the evaluated parameters rather than the triangular distributions used by the Monte Carlo method.

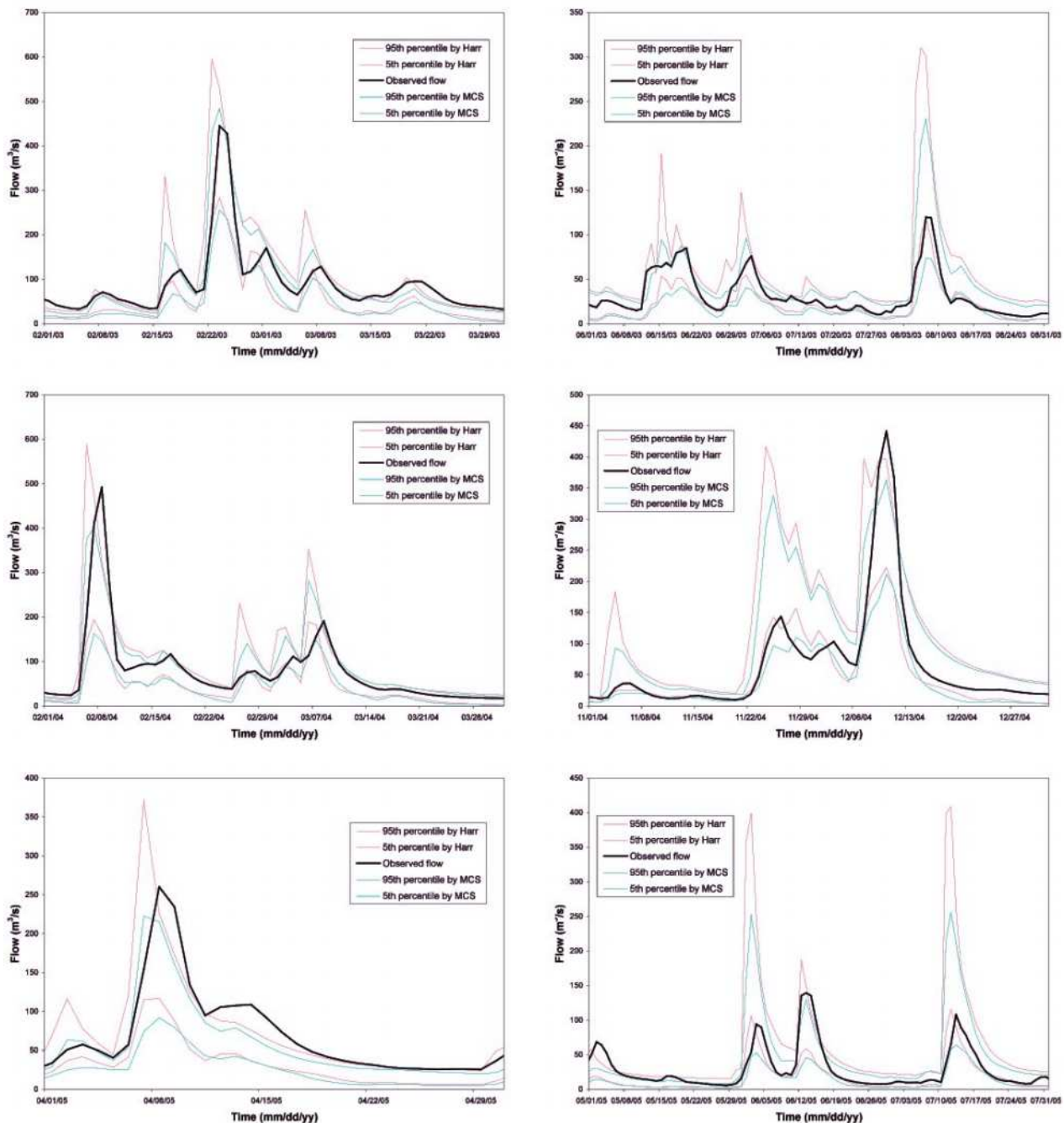


Figure 4: Daily observed hydrographs and uncertainty bounds estimated by the MCS and Harr methods

Table 6: Selected percentiles of the range of the model *Sharpness* using the Monte Carlo and Harr methods

Percentile	MCS m ³ /s	Harr m ³ /s
Minimum	4.8	7.1
25th	10.8	13.4
50th	16.2	19.1
75th	27.0	34.9
Maximum	336.7	444.4

A drawback of the Harr method was the use of several parameter limit values rather than the calculated values to stay within the pre-established range of the HSPF parameters. Detailed definition of the 12 HSPF hydrology parameters used in this study is found in USEPA (2000). It was found that 16% of the coordinate values calculated by the Harr method were outside of the pre-defined parameter ranges (Table 7). Harr coordinate values out of range were changed by the closest limit value. HSPF parameters related to storm events, INTFW and IRC, yielded 20.8% and 16.7% respectively of values out of range. All of the new INTFW values were relocated to the lowest limit and, therefore, peak flows were expected to increase. IRC and AGWRC parameters control the rate at which interflow and groundwater, respectively, are discharged from storage. The KVAR Y parameter is used to describe non-linear groundwater recession rate. All of the new IRC and AGWRC values were changed to the highest limit and thus, slow flow rates in the recession limbs were estimated. The new KVAR Y values were relocated to the lowest limit and consequently, no seasonal variability of the groundwater flow was expected. DEEPFR, BASETP, AGWETP, CEPSC, and LZETP parameters control loss of water from the system and were replaced to the lowest value; therefore, streamflows were expected to increase.

In summary, the rearrangement of the Harr coordinates yielded more streamflow in the system and, therefore, the Harr model *Sharpness* was higher than the Monte Carlo results (baseline scenario). Christian and Baecher (2002) analyzed the problem of coordinate relocation in the Harr method for bounded parameters. They pointed out that “there seem to be no simple, elegant ways out of this dilemma.” The use of other uncertainty methods (e.g. Rosenblueth’s method or the Monte Carlo method) or reducing the number of random variables was recommended by the authors.

Table 7: Number of parameter values calculated out of range by the Harr method

Parameter	Relocation of the coordinates		Number of parameter values out of the range	Percentage of total
	Lowest	Highest		
LZSN	1		1	4.2
INFILT			0	0.0
KVARY	4		4	16.7
AGWRC		2	2	8.3
DEEPFR	9		9	37.5
BASETP	5		5	20.8
AGWETP	7		7	29.2
CEPSC	5		5	20.8
UZSN	1		1	4.2
INTFW	5		5	20.8
IRC		4	4	16.7
LZETP	3	1	4	16.7

Summary and conclusions

Variability of 12 HSPF hydrology parameters was propagated through the USEPA HSPF model to compute the 90% uncertainty bounds of daily streamflow simulations using the Harr probabilistic point estimate method and Monte Carlo simulation. This study used physical data from a watershed in Alabama and Mississippi, USA. The Harr method is a very simple uncertainty method that only uses the mean, standard deviation, and correlation of symmetric variables. The Monte Carlo method is a straightforward uncertainty method that is computationally inefficient for large sets of data and requires the description of the probability distribution function.

In this study, reasonable estimates of mean and standard deviation of 12 HSPF parameters were obtained from a database with 27 model applications in USA. It was shown that the variables were roughly symmetric meaning that a probabilistic definition can be achieved using the Harr method. The Harr method calculated 11% more observed flows within the 90% uncertainty bounds than the Monte Carlo results. Computational efficiency was improved, using 24 runs (two minutes) with Harr’s method to estimate the HSPF 90% uncertainty bounds versus 5.000 runs (12 hours) using the Monte Carlo method. A drawback of the Harr method was the use of several parameter limit values instead of the calculated value to keep the pre-established range of the HSPF parameters. In some parameters around 30% of values were changed and the rearrangement of the

Harr coordinates yielded more streamflow in the system. Therefore, the model *Sharpness* was wider with the Harr results than with the Monte Carlo results (median relative errors around 20% were calculated for model *Sharpness*). Model *Sharpness* was wider with the Harr method because it forced extreme values of each parameter to be sampled with the same or higher frequency as the central values, thus exploring a broader range of HSPF outputs than those generated using the Monte Carlo method (triangular distributions). The Harr method *Sharpness* bias was fairly constant throughout the different flows (below normal, normal, and above normal); however, the model *Reliability* results were variable throughout the different flows, with relative errors of -0.8%, 18.6%, and 15.9% for below normal, normal, and above normal flows, respectively.

The comparison showed that Harr's method could be an appropriate initial indicator of parameter uncertainty propagation on streamflow simulations, in particular on hydrology models with several parameters and high spatial discretization (multidimensional grid models). The Monte Carlo simulations are recommended when knowledge (probability distribution functions of variables) and computational resources (in terms of computational power to solve large sets of data) are feasible. More research is needed to find appropriate estimates of statistical moments (Harr method) and probability distribution function (Monte Carlo method) of model parameters that could improve uncertainty method results.

Acknowledgements

This work was performed with funding from the Northern Gulf Institute project 07-MSU-03 Watershed Modeling Improvements to Enhance Coastal Ecosystems. The writers appreciate the contribution of Cecilia Hernandez, a City University of New York PhD student who developed the MATLAB codes to uncompress and generate time series of NEXRAD rainfall data. The Kelly Gene Cook foundation supported Camacho's graduate assistantship.

References

Al-Abed, N.A. and Whiteley, H.R. (2002). Calibration of the hydrological simulation program fortran (HSPF) model using automatic calibration and geographical information systems. *Hydrological Process* **16**, 3169-3188

Alarcon V.J., McAnally, W., Diaz-Ramirez, J., Martin, J. and

Cartwright, J. (2009). A hydrological model of the Mobile River watershed, Southeastern USA. *AIP Conference Proceedings* **1148**, 641-645

Albek, M., Ögütveren, Ü.B. and Albek, E. (2004). Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. *Journal of Hydrology* **285**, 260-271

Beven, K. and Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* **6**(3), 279-298

Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Jobes, T.H. and Donigian, A.S. (2001). Hydrological Simulation Program – Fortran HSPF version 12, User's Manual. Prepared for AQUA TERRA Consultants Mountain View, California, in co-operation with Water Resources Discipline U.S. Geological Survey Reston, Virginia, and U.S. Environmental Protection Agency Athens, Georgia

Binley, A.M., Beven, K.J., Calver, A. and Watts, L.G. (1991). Changing responses in hydrology: assessing the uncertainty in physically based model predictions. *Water Resources Research* **27**(6), 1253-1261

Butts, M.B., Payne, J.T., Kristensen, M. and Madsen, H. (2004). An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* **298**, 242-266

Carpenter, T.M. and Georgakakos, K.P. (2004). Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulations of a distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology* **298**, 202-221

Christian, J.T. and Baecher, G.B. (2002). The point-estimate method with large numbers of variables. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **26**, 1515-1529

Diaz-Ramirez, J.N., Perez-Alegria, L.R. and McAnally, W.H. (2008). Hydrology and sediment modeling using HSPF/BASINS in a tropical island watershed. *Transactions of the ASABE* **51**(5), 1555-1565

Diaz-Ramirez, J.N., McAnally, W.H. and Martin, J.L. (2011). Analysis of hydrological processes applying the HSPF model in selected watersheds in Alabama, Mississippi, and Puerto Rico. *Applied Engineering in Agriculture* **27**(6), 937-954

Dilks, D.W., Canale, R.P. and Meier, P.G. (1992). Development of Bayesian Monte Carlo techniques for water quality model uncertainty. *Ecological Modelling* **62**, 149-162

Donigian, A.S., Bicknell, B.R. and Imhoff, J.C. (1995). *Hydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF)*. In:

- Computer Models of Watershed Hydrology. Chapter 12, V.P. Singh (editor). Water Resources Publications
- Duan, Z., Diaz, J.N., Martin, J.L. and McAnally, W.H. (2008). Effects of land-use changes on Saint Louis Bay watershed modeling. *Journal of Coastal Research*, Special Issue **52**, 117-124
- Georgakakos, K.P., Seo, D.J. Gupta, H., Schaake, J. and Butts, M.B. (2004). Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty through multimodel ensembles. *Journal of Hydrology* **298**, 222-241
- Gupta, H.V., Beven, K.J. and Wagener, T. (2005). *Model Calibration and Uncertainty Estimation*. In: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. Anderson (editor). John Wiley & Sons Ltd.
- Haan, C.T. (2002). *Statistical Methods in Hydrology*. 2nd ed., Iowa State Press
- Harr, M.E. (1989). Probabilistic estimates for multivariate analysis. *Applied Mathematical Modelling* **13**, 313-318
- Hayashi, S., Murakami, S., Watanabe, M. and Bao-Hua, X. (2004). HSPF simulation of runoff and sediment loads in the upper Changjiang River Basin, China. *Journal of Environmental Engineering* **130**(7), 801-815
- Hummel, P., Kittle, J. and Gray, M. (2001). WDMUtil User's Manual Version 2.0: A Tool for Managing Watershed Modeling Time-Series Data. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology and Office of Water, Washington, D.C.
- Jia, Y. (2004). *Robust Optimization for Total Maximum Daily Load Allocations*. Ph.D. dissertation, University of Virginia
- Laroche, A., Gallichand, J., Lagacé, R. and Pesant, A. (1996). Simulating atrazine transport with HSPF in an agricultural watershed. *Journal of Environmental Engineering* **122**(7), 622-630
- McAnally, W.H., Martin, J.L., Diaz, J.N., Duan, Z., Mancilla, C.A., Tagert, M.L., O'Hara, C. and Ballweber, J.A. (2006). Assimilating Remotely Sensed Data into Hydrologic Decision Support Systems: BASINS Evaluation. Department of Civil Engineering and GeoResources Institute, Mississippi State University, MS
- McIntyre, N., Wheeler, H. and Lees, M. (2002). Estimation and propagation of parametric uncertainty in environmental models. *Journal of Hydroinformatics* **4**(3), 177-197
- Melching, C.S. (1992). An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology* **132**, 157-177
- Melching, C.S. (1995). *Reliability Estimation*. In: Computer Models of Watershed Hydrology, Chapter 3, V.P. Singh (editor). Water Resources Publications, Littleton, CO
- Metropolis, N. and Ulam, S. (1949). The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association* **44**(247), 335-341
- Moore, L.W., Matheny, H., Tyree, T., Sabatini, D. and Klaine, S.J. (1988). Agricultural runoff modeling in a small west Tennessee watershed. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation* **60**(2), 242-249
- Morgan, M.G. and Henrion, M. (1990). *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press
- Nasr, A., Bruen, M., Jordan, P., Moles, R., Kiely, G. and Byrne, P. (2007). A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland. *Water Research* **41**(5), 1065-1073
- Paul, S. (2003). *Bacterial Total Maximum Daily Load (TMDL): Development and Evaluation of a New Classification Scheme for Impaired Waterbodies of Texas*. Ph.D. dissertation, Texas A&M University
- Refsgaard, J.C., and Henriksen, H.J. (2004). Modelling guidelines-terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources* **27**(1):71-82
- Refsgaard, J.C., van der Sluijs, J.P., Hojberg, A.L. and Vanrolleghem, P.A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process - a framework and guidance. *Environmental Modelling and Software* **22**, 1543-1556
- Rogers, C.C.M., Beven, K.J., Morris, E.M. and Anderson, M.G. (1985). Sensitivity analysis, calibration and predictive uncertainty of the institute of hydrology distributed model. *Journal of Hydrology* **81**, 179-191
- Ronen, Y. (1988). *The Role of Uncertainties*. In: Uncertainty Analysis, Y. Ronen (ed.). CRC Press
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **72**(10), 3812-3814
- Singh, V.P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications
- Singh, V.P. and Woolhiser, D.A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrology Engineering* **7**(4), 270-292
- Singh, V.P. and Frevert, D.K. (2002). *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Water Resources Publications
- Sobol', I.M. (1994). *A Primer for the Monte Carlo Method*. CRC Press

- Souid, M.A. (1999). *Reliability of Rainfall-Runoff Models*. Ph.D. dissertation, State University of New York
- Thiemann, M., Trosset, M., Gupta, H. and Sorooshian, S. (2001). Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models. *Water Resources Research* **37**(10), 2521-2535
- Tung, Y.K. (1996). *Uncertainty and Reliability Analysis*. In: *Water Resources Handbook*, L.W. Mays (editor). McGraw-Hill
- Tung, Y.K. and Yen, B.C. (2005). *Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis*. McGraw-Hill
- USEPA US Environmental Protection Agency (2000). BASINS technical note 6: estimating hydrology and hydraulic parameters for HSPF. Available at: <http://www.epa.gov/waterscience/basins/docs/tecnote6.pdf>. Accessed in November 2008
- USEPA US Environmental Protection Agency (2006). HSPFParm version 1.3 beta July 2002. Available at: <http://www.epa.gov/OST/ftp/basins/HSPFParm/>. Accessed in April 7, 2006
- USEPA US Environmental Protection Agency (2011). Better assessment science integrating point and nonpoint sources (BASINS) web site. Available at <http://water.epa.gov/scitech/datatit/models/basins/index.cfm>. Accessed in November 2011
- USEPA US Environmental Protection Agency (2012). Flow calibration tutorial: calibration scenarios. Available at: <http://water.epa.gov/scitech/datatit/models/basins/scenario.cfm>. Accessed in June 13, 2012
- Wagener, T., McIntyre, N., Lees, M.J., Wheater, H.S. and Gupta, H.V. (2003). Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrological Processes* **17**(2), 455-476
- Wu, J. (2004). *Water-Quality-Based BMP Design Approach and Uncertainty Analysis for Integrated Watershed Management*. Ph.D. dissertation, University of Virginia
- Zhang, H.X. and Yu, S.L. (2004). Applying the first-order error analysis in determining the margin of safety for total maximum daily load computations. *Journal of Environmental Engineering* **130**(6), 664-673
- Yu, P.S., Yang, T.C. and Chen, S.J. (2001). Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* **244**, 43-59



Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile

Aplicación del Índice de Sustentabilidad de Cuencas en la cuenca del río Elqui, Centro-Norte de Chile

Fecha de entrega: 8 de junio 2012

Fecha de aceptación: 9 de octubre 2012

Ana Elizabeth Cortés¹, Ricardo Oyarzún^{2,3}, Nicole Kretschmer³, Henrique Chaves⁴, Guido Soto¹, Manuel Soto¹, Jaime Amézaga⁵, Jorge Oyarzún², Tobias Rötting^{5,6}, Michelle Señoret¹ and Hugo Maturana²

¹Water Center for Arid and Semi-Arid Zones in Latin America and the Caribbean CAZALAC, Benavente 980, La Serena, Chile, anaelizabethc@gmail.com, gsoto@cazalac.org, msoto@cazalac.org, michelle.senoret@gmail.com

²Departamento Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena, Benavente 980, La Serena, Chile, hmaturan@userena.cl, joyarzun@userena.cl

³Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas CEAZA, Universidad de La Serena, Raúl Bitrán s/n, Colina El Pino, La Serena, Chile, royarzun@userena.cl, nicole.kretschmer@ceaza.cl

⁴Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Brasilia, SQN 206 Bloc F Apt. 301, 70844.060 Brasilia, DF, Brasil, hlchaves@terra.com.br

⁵School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK, Jaime.Amezaga@ncl.ac.uk

⁶Technical University of Catalonia UPC BarcelonaTech, Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Campus Nord, Modulo D2, c/ Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, Spain, tobias.roetting@upc.edu

The Watershed Sustainability Index WSI, developed as an integrated method to assess the sustainability of basin management, and particularly water resource management, was applied in the Elqui River Basin over a period of five years (2001-2005). The Elqui watershed is located in a semiarid region of Chile, and it has been incorporated into the River Basin Network of the UNESCO HELP Program. The result was an overall WSI score of 0.61 (within a possible range of 0 to 1), rating the basin sustainability as "intermediate". The main watershed strengths were related to the Environment and Policies indicators. On the other hand, the weakness observed in the watershed was related to the Hydrology indicator, mainly due to water scarcity issues. The bottlenecks and limitations identified in this study represent a window of opportunity to improve the current situation in the basin, and calls for more efficient coordination between the different institutions involved in natural resource management. The application of the WSI in the Elqui basin demonstrated the practicality of the method, both as an analytic instrument, and as a useful management tool for water authorities, water users and stakeholders. An important limitation encountered in this study, however, was a general lack of up to date local information. This needs to be addressed in applying the method for mid- to long-term planning and management strategies, both in the Elqui basin and elsewhere.

Keywords: integrated watershed management, hydrology, environment, quality of life, policies

El índice WSI, desarrollado para estimar la sustentabilidad de una cuenca en forma integrada con énfasis en la gestión de recursos hídricos, fue determinado en la Cuenca del Río Elqui considerando un período de 5 años (2001-2005). La cuenca del Río Elqui se ubica en una región semiárida de Chile, y ha sido incorporada a la red de cuencas hidrográficas del programa HELP de la UNESCO. El resultado fue un valor global de 0.61 para el indicador WSI (en el rango de 0 a 1), calificando el nivel de sustentabilidad como "intermedio". Las mayores fortalezas de la cuenca se relacionaron con los indicadores de Ambiente y de Políticas. Por otro lado, las mayores debilidades observadas en la cuenca se relacionaron con el indicador de Hidrología, debido principalmente a la situación de escasez hídrica. La identificación de estas limitantes representan una oportunidad para mejorar la actual situación en la cuenca, lo que obliga a una coordinación más eficiente entre las diferentes instituciones involucradas en la gestión de los recursos naturales. La aplicación del WSI a la Cuenca de Elqui demostró su utilidad como instrumento analítico así como herramienta de gestión para autoridades relacionadas con el agua, usuarios y grupos de interés. Sin embargo, la actualización de la información local es necesaria para la planificación a mediano y largo plazo y la formulación de estrategias de desarrollo para esta cuenca y otras.

Palabras clave: gestión integrada de cuencas, hidrología, ambiente, calidad de vida, políticas



Introduction

The Brundtland Report in 1987 (Brundtland, 1987) and the 1992 Rio Declaration on Environment and Development laid the foundations for sustainable development (Hezri and Hasan, 2006). New environmental governance frameworks subsequently began to emerge, based on growing recognition of the need for development-aimed actions that meet the needs of both current and future generations in an equitable manner (Machinea *et al.*, 2005). It was accepted that sustainable development should not only stimulate economic growth, but it should also promote the equitable distribution of wealth, prioritize environmental issues, and empower people rather than marginalizing them (UNDP, 1994).

Chile has adopted these concepts, and since 1994 the country has had a system of public environmental management, which has been subject to a number of recent reforms (Lostarnau *et al.*, 2011). Moreover, Chile also recently joined the Organization for Economic Co-operation and Development OECD, a move that triggered the emergence of a number of new natural resource management policies. Collectively, these developments suggest that environmental issues have started to gain increasing importance in the country, and that there has been a general improvement in environmental policies and actions. Within this context, a topic that has gained increasing prominence is that of integrated watershed management and water resources protection, underscored by the formulation of three recent policy instruments: the National Strategy for Integrated Watershed Management (CONAMA, 2007), the National Glacier Policy (CONAMA, 2009), and the Secondary Surface Water Quality Regulations (CONAMA, 2004). The general objective of the National Strategy for Watershed Management is “to protect water resources, both in terms of quantity and quality, in order to safeguard human consumption and harmonize conservation objectives of ecosystems with the sustainable use of water resource by economic activities” (CONAMA, 2007), and has direct bearing on the subject of this paper.

As Perlack *et al.* (2001) stated, “watersheds comprise highly complex systems that provide a major challenge to those who would attempt to understand and control them”. Although the integrated watershed management approach includes several factors, resources, and stakeholders, the issue of water resources tends to be one of the key

components of the system, because water confers territorial integrity and connectivity to a basin, and it is a central determinant of the health and character of ecosystems (Saravanan *et al.*, 2009). Indeed, water management actions, particularly important in arid and semi-arid areas where water resources are scarce, must consider sustainability issues. Thus, quantitative indicators and means of objective verification are critical in assessing the degree of application, development and outcomes of intervention strategies and natural resource use, as well as the extent to which sustainable development is realized (Hezri and Hasan, 2006; Hooper, 2010).

Sustainability indicators are means by which to assess the degree to which these criteria are met, since they help to translate abstract concepts into measurable parameters (Lee and Huang, 2007). In particular, they have become useful tools for water resources planning and management activities (Molle and Mollinga, 2003; Araral, 2010; Hooper, 2010), provided they fulfill certain preconditions: they should be easy to apply, comprehensive and universally applicable. In addition, they must be useful beyond administrative boundaries, and must consider cause-effect relationships (Chaves and Alipaz, 2007). Last but not least, they must be quantifiable, remain sensitive to changes in time and space, and amenable to revision (Ledoux *et al.*, 2005; Lee and Huang, 2007).

Although there are several environmental, sustainability, and water scarcity indices described in the literature (*e.g.* Molle and Mollinga, 2003; Sullivan *et al.*, 2003; Ledoux *et al.*, 2005; Lee and Huang, 2007), these are not basin-specific and are not designed to assess watershed sustainability with respect to integrated water resources management. Within this framework, the International Hydrology Program IHP of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization UNESCO, through its Hydrology, Environment, Life and Policy HELP platform, started and supported the search and development of an index in line with its development strategy. The Watershed Sustainability Index WSI, was developed to meet these needs (Chaves and Alipaz, 2007). The WSI takes into account hydrologic, environmental, livelihood and policy issues in order to provide an integrated assessment of the current state of watershed management in a given basin for a specific period of time.



In 2008 the Elqui river basin, located in arid North-Central Chile, was included in the HELP worldwide watershed network program. One of the first initiatives carried out was to use the WSI approach to assess the prevailing level of sustainability and management practices adopted in the basin. The application of the WSI, which is presented in this contribution, was carried out as part of the working tasks of the UNESCO-supported Water Center for Arid and Semi-Arid Zones in Latin America and the Caribbean CAZALAC, within the framework of the Coquimbo Region Water Round Table lead by DGA-CAZALAC, and as part of the activities of the CAMINAR project (Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi Arid South America). CAMINAR was a research and development project funded by the European Commission as part of the 6th Framework Program, executed between 2007 and 2010. Its general scope was “to contribute to the establishment of policy options, management strategies and technologies for the sustainable management of ecosystems in river-basins of arid and semi-arid South America which are subject to impacts from mining, using Peru, Bolivia and Chile as demonstration countries” (Amézaga *et al.*, 2007). Three test cases were selected, comprising the Chili River (Peru), Poopoo Lake (Bolivia), and the Elqui River (Chile). Within this framework, a watershed sustainability index WSI was determined for the Elqui basin, which constitutes the main objective of this work. In addition to applying the WSI in the UNESCO-HELP Elqui river basin, an analysis of the potential and limitations of the approach, and sustainability indicators in general, was also performed.

Methodology

Area of study

The Elqui river basin is located in North-Central Chile, between 29°27' - 30°34'S and 71°22' - 69°52' W, covering an area of *ca.* 9700 km² (Figure 1). It includes three sub-watersheds: Turbio river (*ca.* 4200 km²), Claro river (*ca.* 1550 km²), and Elqui river (*ca.* 3950 km²) (Oyarzun *et al.*, 2006; Galleguillos *et al.*, 2008). The Turbio river originates from the confluence of the Toro river, which drains the Au-Cu-As mining district of El Indio, and the La Laguna river, the latter partly sustained by the melting of the receding El Tapado glacier. The Claro river originates from the confluence of the Derecho and Cochiguaz rivers. From the

headwaters to the Pacific Ocean, the Elqui River system receives water contributions from several minor streams, some of them permanent and others ephemeral. The whole hydrological system extends between the Andean mountains and the Pacific Ocean over a length of only 150 km. Thus, the watershed presents extreme altitude differences between its headwaters and its discharge point to the sea (*i.e.* about 5,000 m for a horizontal distance of only 150 km), which favours the existence of turbulent river flows.

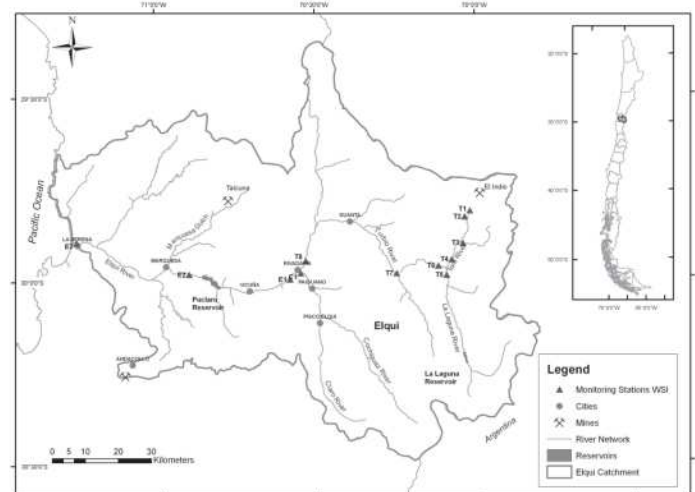


Figure 1: Elqui river basin with main tributaries, cities, mining districts and water monitoring stations (T1: Malo river after El Indio; T2: Baños del Toro; T3: Vacas Heladas river before Malo river; T4: Toro river before La Laguna; T5: La Laguna before Toro river; T6: Turbio river after La Laguna and Toro rivers; T7: Incaguaz river before Turbio river; T8: Turbio river at Varillar; C1: Claro river at Rivadavia; E1: Elqui river at Algarrobal; E2: Elqui river at Amendral; E3: Elqui river at La Serena)

Four major geomorphologic units are recognized in the Elqui basin (Paskoff, 1993): Andean High Mountains (elevations above 3000 m), Middle Mountains (hills with elevations between 600 and 3000 m, highly dissected with both non-permanent and permanent small discharge streams), Fluvial Valleys (E-W oriented terraces) and the Coastal Border (broad marine and fluvio-marine terraces).

The geology of the basin comprises Lower Paleozoic to Upper Tertiary, calco-alkaline plutonic and volcanic rocks (lava flows and pyroclastic rocks), with some marine, partly carbonatic sedimentary intercalations of Jurassic and Lower-Cretaceous age. The rocks are highly fractured and those of Cretaceous and Tertiary age present abundant



mineral deposits (Cu, Au, Ag, Mn, As) and hydrothermal alteration zones (Oyarzún *et al.*, 1998, Oyarzún *et al.*, 2003). Quaternary alluvial aquifers present relatively low yields, except in the lower course of the Elqui river valley. On the other hand, fractured and altered volcanic rock strata present medium permeabilities and thus behave as effective but low-transmissivity aquifers.

Climatic conditions are determined by the interaction of the orographic surface and the Pacific Ocean with the cold Humboldt Current and the south-eastern Pacific anticyclone, generally resulting in low precipitation restricted to the winter months. In the coastal zone and up to some 40 km inland, a Coastal steppe climate with abundant clouds prevails. In the Middle Mountains, above 800 m of altitude, there is a warm steppe climate, characterized by the lack of clouds and higher temperatures. Finally, in the Andean Cordillera area, above 3000 m of altitude, there is a moderate cold climate with higher precipitation, lower temperatures and permanent snow accumulations (Llanca and Miranda, 2003). Also, it is common to find local microclimates throughout the valley that allow the cultivation and growth of mediterranean and subtropical species such as papaya, mango, avocado, lemons, and grapes. An average annual rainfall of approximately 90 to 100 mm is experienced in the Coast and in the Middle Mountains areas. This figure is probably doubled in the Andean High Mountains where precipitation mainly falls as snow, although precipitation data are generally sparse and less reliable. A majority of the precipitation in the watershed occurs between May and August (UNESCO, 2010), and the highest runoff (controlled by snow-ice melting), takes place in spring-summer. Thus, both snow and ice constitute the source for the base discharge in the Elqui basin. Actual evapotranspiration ranges between 65 and 750 mm/year for native vegetation and irrigated agricultural crops respectively (Kalthoff *et al.*, 2006).

River discharge in the Elqui River watershed is highly variable in both space and time. The Turbio River exhibits an annual average discharge between 0.8 and 7.1 m³/s; in the Claro River the annual average discharge ranges between 1.5 and 4.5 m³/s, while in the Elqui River it ranges between 4.3 and 12.5 m³/s (Galleguillos, 2004). Also, due to the ENSO cycle, the Elqui runoff has historically been highly variable (*e.g.* as low as 2.4 and as high as 33 m³/s

or even greater). However, the existence of the Andean La Laguna reservoir (with an accumulation volume of 40 million m³), operating since 1941, and the rather recent construction and operation (November 2002) of the Puclaro dam (200 million m³ of capacity) has contributed to regulate the Elqui river discharge, particularly in its lower course (Galleguillos *et al.*, 2008).

Despite the arid and variable climatic conditions, the Elqui basin has undergone significant agricultural and agro-industrial development, supported by an extensive system of irrigation channels with a total irrigated area of 13.000 ha (Guevara *et al.*, 2006). The agricultural production in the Elqui valley is now worth US\$40 million a year.

Historically, mining has also been important in the area. Three mining districts in the Elqui basin are of major importance, although they differ in terms of the type and relevance of their polluting effects on the watershed: the Andacollo, Talcuna, and El Indio districts. The Andacollo Cu-Au district, connected to the Elqui valley from the South via El Arrayán creek, includes a 450 million ton copper deposit and important epithermal gold ore bodies (Higueras *et al.*, 2004). The Talcuna copper district (Oyarzún *et al.*, 1998), in the Quebrada Marquesa stream, north side of the Elqui River, has been responsible for several pollution episodes, by tailing deposit spills due to operational failures. Finally, El Indio Au-Cu-As district (Jannas *et al.*, 1999) at the head of the basin, at an altitude above 4000 m, is directly connected to the Rio del Toro, and therefore, to the Elqui river. Active from the mid 1970s until 1999, the mining company located in the area initiated a closure plan in 2003. However, the district, which is located on a belt of hydrothermal alteration zones, has been a natural source of acid drainage for at least 10,000 years, and delivers important loadings of As, Cu, Zn, Fe and SO₄ to the Rio del Toro water, which are largely in excess of the Chilean standard for irrigation water (Oyarzún *et al.*, 2004).

WSI Index and its application

The WSI is described in detail in Chaves and Alipaz (2007) and UNESCO (2008). Thus, only the key aspects of the index, as well as some modifications performed within this contribution, are covered here.

The Watershed Sustainability Index is an integrated basin indicator, used to estimate basin sustainability, taking into



account hydrological, environmental and socioeconomic issues. The WSI is given by (Chaves and Alipaz, 2007; UNESCO 2008):

$$WSI = (H + E + L + P) / 4 \quad (1)$$

where WSI (0-1) is the watershed sustainability index; H (0-1) is the hydrologic indicator; E (0-1) is the environmental indicator; L (0-1) is the life (livelihood) indicator; and P (0-1) is the policy indicator. All indicators have the same weight (Chaves and Alipaz, 2007).

Each indicator in equation (1) is obtained from appropriate tables, that consider factors such as *Pressure* (i.e. human activities that cause or can provoke impacts to the environment), *State* (i.e. situation of different aspects of the

environment at a given moment), and *Response* (relating to the societal efforts to adress environmental problems and reclaim impaired systems). The advantage of using a *Pressure-State-Response* approach lies in the fact that it takes into account cause-effect relationships, allowing different stakeholders, managers, and decision makers to recognise and understand the interconnections between the parameters (OECD, 2003). The WSI indicators and parameters, including their levels and scores, are presented in Tables 1, 2, and 3.

Due to data availability and logistical issues, the WSI was determined at the Elqui river basin for the period 2001-2005. However, the parameters requiring long-term means were estimated for the period 1978-2005.

Table 2: State parameters, level, and scores of the Watershed

Table 1: Pressure parameters, level, and scores of the Watershed Sustainability Index

Indicator	Pressure parameters	Level	Score
Hydrology	$\Delta 1$ -variation in the basin per capita water availability in the period studied, relative to the long-term average (m ³ /person year)	$\Delta 1 < -20\%$ $-20\% < \Delta 1 < -10\%$ $-10\% < \Delta 1 < 0\%$ $0 < \Delta 1 < +10\%$ $\Delta > +10\%$	0.00 0.25 0.50 0.75 1.00
	$\Delta 2$ -variation in the basin BOD ₅ in the period studied, relative to the long-term average	$\Delta 2 > 20\%$ $20\% > \Delta 2 > 10\%$ $0 < \Delta 2 < 10\%$ $-10\% < \Delta 2 < 0\%$ $\Delta 2 < -10\%$	0.00 0.25 0.50 0.75 1.00
Environment	Basin Environment pressure index (rural and urban) in the period studied	$EPI > 20\%$ $20\% < EPI > 10\%$ $10\% < EPI < 5\%$ $5\% < EPI < 0\%$ $EPI < 0\%$	0.00 0.25 0.50 0.75 1.00
Life	Variation in the basin per capita Human Development Index (HDI)-Income in the period studied, relative to the previous period	$\Delta < -20\%$ $-20\% < \Delta < -10\%$ $-10\% < \Delta < 0\%$ $0 < \Delta < +10\%$ $\Delta > +10\%$	0.00 0.25 0.50 0.75 1.00
Policy	Variation in the basin HDI-Education in the period studied, relative to the previous period	$\Delta < -20\%$ $-20\% < \Delta < -10\%$ $-10\% < \Delta < 0\%$ $0 < \Delta < +10\%$ $\Delta > +10\%$	0.00 0.25 0.50 0.75 1.00



Sustainability Index

Indicator	State parameters	Level	Score
Hydrology	Basin per capita water availability (m ³ /person year), considering both surface and groundwater sources	Wa < 1700	0.00
		1700 < Wa < 3400	0.25
		3400 < Wa < 5100	0.50
		5100 < Wa < 6800	0.75
		Wa > 6800	1.00
	Basin averaged long term BOD ₅ (mg/l)	BOD > 10	0.00
		10 < BOD < 5	0.25
		5 < BOD < 3	0.50
		3 < BOD < 1	0.75
		BOD < 1	1.00
Environment	Percent of basin area under natural vegetation (Av)	Av < 5	0.00
		5 < Av < 10	0.25
		10 < Av < 25	0.50
		25 < Av < 40	0.75
		Av > 40	1.00
Life	Basin Human Development Index (HDI), weighed by county population	HDI < 0.5	0.00
		0.5 < HDI < 0.6	0.25
		0.6 < HDI < 0.75	0.50
		0.75 < HDI < 0.9	0.75
		HDI > 0.9	1.00
Policy	Basin institutional capacity in Integrated Water Resources Management (legal and organizational)	Very poor	0.00
		Poor	0.25
		Medium	0.50
		Good	0.75
		Excellent	1.00

Table 3: Response parameters, level, and scores of the Watershed Sustainability Index

Indicator	Response parameters	Level	Score
Hydrology	Improvement in water-use efficiency in the basin, in the period studied	Very poor	0.00
		Poor	0.25
		Medium	0.50
		Good	0.75
		Excellent	1.00
	Improvement in adequate sewage treatment/disposal in the basin, in the period studied	Very poor	0.00
		Poor	0.25
		Medium	0.50
		Good	0.75
		Excellent	1.00
Environment	Evolution in basin conservation areas (Protected areas and Best Management Practices) in the basin, in the period studied	$\Delta < -10\%$	0.00
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0.25
		$0 < \Delta < +10\%$	0.50
		$+10\% > \Delta > +20\%$	0.75
		$\Delta > 20\%$	1.00
Life	Evolution in the basin Human Development Index in the basin, in the period studied	$\Delta < -10\%$	0.00
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0.25
		$0 < \Delta < +10\%$	0.50
		$+10\% > \Delta > +20\%$	0.75
		$\Delta > 20\%$	1.00
Policy	Evolution in the basin's Water Resources Management expenditures in the basin, in the period studied	$\Delta < -10\%$	0.00
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0.25
		$0 < \Delta < +10\%$	0.50
		$+10\% > \Delta > +20\%$	0.75
		$\Delta > 20\%$	1.00



Data

The information required to determine the WSI for the Elqui river basin was obtained from several sources, such as available technical reports and public information, as well as through informal interviews with professionals and authorities of both public and private organizations and institutions of the Coquimbo Region. Further details are presented in Cortés (2010).

Hydrological information was mainly obtained from the Chilean Water Authority (*Dirección General de Aguas*, DGA), which manages a network of discharge and water quality monitoring stations placed throughout the basin (Figure 1). Also, the Elqui River Water Board (*Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes*) provided information on water diverted to irrigation channels and historic water reservoir levels. Information regarding water use efficiency investments in the basin was obtained from the National Irrigation Commission (*Comisión Nacional de Riego*, CNR) and the Coquimbo Region Government (*Gobierno Región de Coquimbo*, GORE-C). This information included detailed annual records of public works investment and subsidized farm irrigation projects (e.g. drip, trickle irrigation) in the form of Excel spreadsheets. In addition, a thorough literature search and analysis was carried out regarding water quality issues from previous studies carried out in the basin (e.g. Galleguillos, 2004; Guevara *et al.* 2006; Galleguillos *et al.* 2008; Espejo *et al.*, 2012). Finally, interviews were held at the Sanitary Services Authority (*Superintendencia de Servicios Sanitarios*, SISS).

For the *Environment* component, information was obtained from Agricultural Activity and Demographic Census, which is carried out in Chile by the National Statistics Institute (*Instituto Nacional de Estadísticas*, INE) every ten years, although not simultaneously for both topics. Moreover, this information is provided for the municipality level (the lowest administrative division in Chile), and needs to be translated into the basin level. There was additional statistical information available at INE at the Region scale. Finally, interviews were held at the Chilean Environmental Commission (*Comisión Nacional del Medio Ambiente*, CONAMA), currently Environmental Ministry (*Ministerio del Medio Ambiente*), the Chilean Forestry Service (*Corporación Nacional Forestal*, CONAF) and

the Chilean Agricultural and Livestock Service (*Servicio Agrícola y Ganadero*, SAG). These interviews conveyed valuable information, in particular regarding the current status of protected areas in the Coquimbo Region, where the Elqui basin is located.

Regarding the *Life* component, the Human Development Index HDI, of the United Nation's Development Program PNUD and related information was considered. The HDI covers aspects such as income, health and education. It is available at the municipality level. Although this information was not up to date, it was nevertheless used with this caveat in mind. In order to align the dates of data availability (1994, 1998, and 2003) with the period considered in this study, INE's demographic statistics and projections were used. Finally, regarding the *Policy* component, some of the information was retrieved from the sources already mentioned.

WSI adaptations

With respect to the WSI methodology, as described in Chaves and Alipaz (2007) and UNESCO (2008), some modifications were made in its application to the Elqui basin:

- Spatial extent of the unit of analysis: although the original methodology suggests a maximum basin area of 2500 km², the WSI was determined for the Elqui basin as a whole. This was done because some information existed only at the municipality level, and this administrative subdivision does not necessarily coincide with the sub-basin delineation. It was therefore decided to aggregate the information at the Province scale given the fact that, at least in the Elqui basin, their boundaries are more coincident.
- Water quality parameter: since the WSI methodology allows for the substitution of BOD₅, originally considered in Chaves and Alipaz (2007), by other critical water quality parameters, Electric Conductivity EC was chosen instead. Although this parameter does not give specific information on the particular ions in the water, it could be of great help in detecting possible environmental impacts derived from mining or agriculture in the basin. Thus, the thresholds described in the Chilean water quality regulation, NCh 1333 (INN, 1987), the World Health Organization water quality regulation (WHO, 2008), as well as in the Chilean secondary water quality regulations (CONAMA, 2004)



were considered. From this, levels and ranges were defined for the State component (Table 4).

Table 4: Levels and scores suggested for the electric conductivity in the Elqui river basin

Sub-indicator	Parameter	Level	Score
Water quality	Long term Electric Conductivity EC, basin's average, mmhos/cm	EC > 2250	0.00
		2250 > EC > 1600	0.25
		1600 > EC > 750	0.50
		750 > EC > 600	0.75
		EC < 600	1.00

c) Environmental-Response parameter: this parameter considers the evolution in protected areas, but could not be determined in this study, as a result of the fact that no statutory protected areas (managed under the official *Sistema Nacional de Areas Silvestres Protegidas del Estado*, SNASPE) exist in the Elqui basin at present. However, there is a Governmental Program oriented towards the reclamation of degraded and/or eroded soils (the *Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados*, SIRSD-Sustentable), which was considered as a suitable alternative for the Environmental Response parameter determination.

Validation workshop

After the initial data gathering, systematization and analysis, a stakeholder validation workshop of both the WSI methodology and the preliminary results was held with different local stakeholders, in particular those participating in the Coquimbo Region Water Round Table. This activity was especially useful for determining qualitative aspects considered by the WSI, such as those related to Policy-State parameters. The workshop was held on the 16th and 17th of November 2009, with an attendance of 34 people.

Results

Since the WSI is computed on the basis of the scores of its four indices, each of them is presented separately, and the overall sustainability index (equation (1)) is obtained in the end.

Hydrology Indicator

The hydrology indicator score is the mean of the basin's water quantity and quality components. In the case of the former, the per-capita water availability (*Hydrology-State*) was derived from the sum of long-term mean river stream flow rate plus the available groundwater yield, estimated from the existing water rights, divided by the basin population in the period studied.

At the Algarrobal Station (downstream of the confluence of the Turbio and Claro rivers, E1 in Figure 1), the Elqui river has a long-term mean discharge of 12.9 m³/s. In the case of groundwater, all the granted rights in the basin, being an estimation of groundwater use/availability, correspond to 7.9 m³/s. Thus, the ratio of water yield (12.9 plus 7.9 m³/s) to total basin population (237135 inhabitants in 2005; INE, 2009), results in the per-capita water availability *Wa* of 2766 m³/hab/yr, corresponding to a score of 0.25. In the case of the water-quantity *Pressure* parameter, the change in *Wa* in the 5 year period considered, with respect to the long term average, was -3.3%, indicating a relatively dry period compared to the mean flow. This, according to Table 1, resulted in a score of 0.5. In the case of water-quantity *Response* parameter, there were moderate investments in water use efficiency improvement, focused on drip irrigation methods at the farm level. Thus, a 0.5 score was attributed to the parameter. Hence, the averaged *Pressure*, *State*, and *Response* parameters for water quantity in the basin for the period studied was $(0.25+0.5+0.5) / 3 = 0.4$.

In the case of water quality, the *Pressure* parameter corresponded with the variation in electric conductivity over the 5 year period (-0.10%), yielding, according to Table 1, a score of 0.75. The *State* parameter (the basin's EC long-term average) was equal to 1525 mmhos/cm, resulting in a score of 0.5. The *Response* parameter for water quality resulted in a score of 0.5, corresponding with a moderate investment rate in sewage treatment in the 5 years studied. The quality average score was therefore $(0.5+0.75+0.5) / 3 = 0.6$.

Although WSI considers the basin's mean value of the "representative water quality parameter" (in this case, EC), it is important to consider its spatial behaviour. Indeed, the WSI, like many indices, represents a mean value, and although this simplifies the analysis, it may be somewhat



misleading when spatial or temporal variabilities occur. In the case of the Elqui basin, the EC exhibits great variability throughout the watershed (Figure 2), with especially high values in the Turbio river headwaters, which levels off when using the basin global mean.

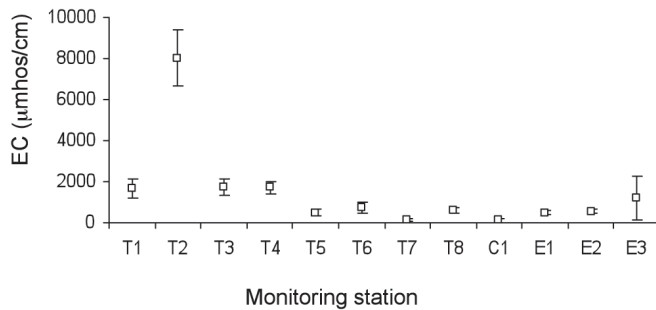


Figure 2: Average long term (1990-2005) electric conductivity EC in monitoring stations throughout the Elqui basin (vertical bars represent standard deviation)

As an alternative approach, it could be of interest to express the water quality issue in terms of an index rather than as a single parameter. A number of recent studies carried out in various North-Central Chilean basins have demonstrated the potential for this approach (e.g. Espejo *et al.*, 2012).

The overall *Hydrology* score was the mean of the water quantity and quality scores, *i.e.*, $(0.4+0.6) / 2 = 0.5$.

Environment Indicator

Similarly to the *Hydrology* indicator, the *Environment* term was obtained as the mean of *State*, *Pressure*, and *Response*. In the case of *Pressure*, the basin variation in agricultural area and urban population in the period studied was +3.4 and +8.9% respectively, yielding an Environment Pressure Index EPI value of $(3.4\%+8.9\%)/2 = +6.2\%$. This corresponds with an *environmental Pressure* score of 0.5. In the case of *environmental State*, the basin maintained more than 70% of its original vegetation cover between 1997 and 2007 (INE, 2007), and it was therefore assumed to be the same for 2005. This, according to Table 2, resulted in a value of 1.0. However, this score should be used with caution. Indeed, although the natural vegetation cover, represented by prairies, shrubs and small trees, seems high, it is particularly vulnerable to climatic oscillations and to variations in external pressure factors (e.g. goat livestock grazing), as noted in Squeo *et al.* (2002). Regarding *environmental Response*, and according to the available

data, 817 ha, representing 0.1% of the Elqui basin area, benefited from the SIRSD-Sustentable Program. According to Table 3, this yields a score of 0.5. Therefore, the overall score for the Environment indicator was $(0.5+1+0.5) / 3 = 0.7$.

Life indicator

The *Life-Pressure* parameter score in the basin was obtained from the variation in the basin's HDI-Per capita income sub-index in the 5 year period (2001-2005). Over this period, there was a decrease of -1.4% in HDI-Income (UNDP, 2003; INE, 2009) resulting, according to Table 1, in a score of 0.5 for this parameter. In the case of *Life-State* parameter, the basin HDI in the year previous to the period studied was 0.75, resulting in score of 0.75. The *Life-Response* parameter, *i.e.*, the evolution of the HDI in the basin in the period studied, was 0.39%, which yielded a score of 0.5. The overall Life score for the basin was therefore $(0.5+0.75+0.5) / 3 = 0.58$.

Policy indicator

The *Policy-Pressure* parameter (variation in the HDI-Education sub-indicator in the 5 year period) for the basin was -7.33%, resulting in a score of 0.5. This indicates that there was a moderate decrease in the educational level of the basin over the period of analysis. This is an important issue, since problems in education will hinder active, informed, and responsible participation by citizens (societal engagement) in integrated water resources management initiatives and sustainable development efforts. As for *Policy-State* parameter (basin institutional capacity), although there is a legal framework available (water and environmental laws and regulations), there are problems with the application and enforcement of these laws. Also, basin stakeholders recognize the importance of several water users' organizations in the basin. There are negative perceptions of the level of protection of the basin water resources (in terms of quantity and quality) however. Thus, the basin condition was ranked as "regular" in this respect, with a corresponding score of 0.5. With regard to *Policy-Response*, the basin expenditures in water resources management initiatives increased by 331% in the period analysed, yielding a value of 1.0 for that parameter. Therefore, the overall Policy indicator was the mean of the three policy parameters, *i.e.*, $(0.5+0.5+1) / 3 = 0.7$.



Overall watershed sustainability

The WSI is simply the global mean of the four (H-E-L-P) indicators and the Pressure/State/Response columns. Therefore, an overall WSI score of 0.61 was obtained for the Elqui river basin (Table 5).

According to Chaves and Alipaz (2007), the score obtained for the Elqui watershed ranks in the intermediate level of basin sustainability. Additionally, the indicator with the lowest score was *Hydrology* (0.5), whereas the indicators with the highest scores were *Environment* and *Policy* (0.67). In terms of the *Pressure*, *State* and *Response* factors, the lowest score was obtained for *Pressure* (0.53), and the highest for *State* (0.66). This indicates that although the current basin conditions (*State*) are moderately good, there are still pressures threatening basin sustainability.

The parameters considered as “bottlenecks” in the Elqui basin, namely, those which are lower than the overall WSI, are highlighted in Table 5. These parameters in particular must be addressed by water users, stakeholders, and decision makers in order to improve the overall watershed sustainability in the short and long run. It can be seen that a major bottleneck relates to the quantity of water available in the basin. This fact is not surprising for basins in arid or semiarid areas, stressing the need for efficient water management.

Discussion

The WSI has as advantages its simplicity, flexibility, and adaptability. Also, as with any other index, it could be a useful means for both transmitting information to general audiences and for decision making (Debels *et al.*, 2008). Indeed, sustainability indices such as the WSI can help to

provide decision makers with comprehensive information on protection and welfare restoration for the environment and humanity (Lee and Huang, 2007). In particular, they may be especially useful to assess the evolution of basins experiencing rapid change due to demographic or industrial development, as well as to compare the evolution of different basins of a region.

On the other hand, the WSI, in common with other indices (*e.g.* see Molle and Mollinga, 2003) presents a number of limitations. These are mainly related to difficulties in obtaining up to date local information (*i.e.* at the watershed level), which probably constitutes one of the major challenges facing implementation of the WSI in developing countries such as Chile.

During the development of the present work it was noticed that there is a certain amount of reluctance by a number of public and private institutions to make information available in the public domain. A similar situation was described, also in the Coquimbo Region, by Aldunce and León (2007) regarding natural risk management issues. This mentality seems to prevail despite the existence in Chile since 2009 of the 20.285 Act on Transparency and Public Information Access, which, at least in theory, should facilitate public access to information (Chilean Government, 2009). In some cases, information is available in different time scales and in periods which are not coincident (*e.g.* the situation of demographic and agricultural census), which further complicates attempts to apply the index.

As with any index, both the global as well as intermediate scores must be carefully considered (Lee and Huang, 2007; Debels *et al.*, 2008). For example, it is important to re-address the situation of the environmental-*State*

Table 5: Parameter scores and Watershed Sustainability Index for the Elqui river basin in the period 2001-2005

	Pressure		State		Response		Result
	Level, %	Score	Level	Score	Level	Score	
Hydrology	-3.37	0.5	2,766	0.25	Medium	0.5	0.50
	-0.10	0.75	1,525	0.50	Medium	0.5	
		0.63		0.38		0.5	
Environment	7.0	0.5	0.72	1.00	0.1%	0.5	0.67
Life	-1.3	0.5	0.76	0.75	0.52	0.5	0.58
Policy	-7.34	0.5	Medium	0.50	>20%	1.00	0.67
Result		0.53		0.66		0.63	0.61



component. As previously explained, a proxy was used for the determination of this component since there are no official protected areas in the Elqui basin currently. The value of 1.0, therefore, may be misleading. A lack of statutory protection results in conditions generally considered unfavourable for sustainable development. According protected status to areas identified as important in terms of biodiversity (CONAMA, 2002) would be highly desirable, both from an environmental point of view as well as in terms of the sustainability of the system.

If the current lack of information is adequately addressed and existing data regularly updated, and if applied within a sustained framework of integrated watershed management supported by a sound public-private alliance, the performance of the WSI could be improved to the extent that it could be considered a useful indicator of basin sustainability.

Conclusions

A Sustainability Watershed Index of 0.61 was obtained for the Elqui river basin for the period 2001-2005, which can be considered as an intermediate sustainability level. The WSI tool proved to be a useful, simple and adaptable instrument to assess the current state of sustainability of a watershed, suitable as a mean to support decision making processes toward integrated and environmentally oriented watershed management. The bottlenecks and limitations (*e.g.* Hydrology-*State* in the case of Elqui) identified in this study represent a window of opportunity to improve the current situation in the basin, and calls for more efficient coordination between the different institutions involved in natural resource management.

The WSI is a holistic index, of great potential for environmental management purposes, given the fact it incorporates social, economic and environmental factors into the sustainability analysis. Indeed, it can be said that this tool, provided it is applied regularly (*e.g.* every 5 years), can provide a suitable description of the evolution of basin conditions in terms of sustainability, assisting different stakeholders and water managers in the planning, decision-making and implementation of local strategies for sustainable development. Its use as a reference tool is recommended in all cases where definition and enforcement of watershed management plans, and performance

verification mechanisms and indices is required.

Acknowledgements

We thank the commitment of all the institutions, both public and private, that contributed with information and participated in the workshop during the development of this study. Also, we thank Craig Weideman for his proofreading of the English. This work is based on the MSc (Applied Environmental Management) Graduation Project of the first author, and was partially funded by the CAMINAR Project (European Commission, 6th Framework Program, contract number INCOCT2006-032539). This contribution is made as part of the Research Program on Water Resources and Environment (PRHIMA) of the Departamento Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena. The paper benefited from the comments of two anonymous reviewers.

References

- Aldunce, P. and León, A. (2007). Opportunities for improving disaster management in Chile: a case study. *Disaster Prevention and Management* 16 (1), 33 - 41
- Amézaga, J., Balvin, D., Abanto, C., Younger, P.L. and Rötting, T.S. (2007). ERMISA and CAMINAR Projects: Research on environmental Regulation, Catchment Management and Mining Impacts in South America. In R. Cidu and F. Frau (Eds) *Water in Mining Environments*. Mako Edizioni, Cagliari, 307 - 311
- Araral, E. (2010). Improving effectiveness and efficiency in the water sector: Institutions, infrastructure and indicators. *Water Policy* 12 Supplement 1, 1 - 7
- Brundtland, G.H. (1987). *Our Common Future*. The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, USA
- Chaves, H.M.L. and Alipaz, S. (2007). An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. *Water Resources Management* 21(5), 883 - 895
- Chilean Government (2009). Ley de Transparencia, por un Chile más transparente. Ley N° 20.285 sobre acceso a la información pública. Available at: <http://www.leydetransparencia.gob.cl> (Last accessed: May 2011)
- CONAMA (2002). *Estrategia Regional y Plan de Accion de la*



Biodiversidad IV Region de Coquimbo, Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago, Chile.

CONAMA (2004). *Guía CONAMA para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago, Chile

CONAMA (2007). *Estrategia Nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago, Chile.

CONAMA (2009). *Política para la Conservación y Protección de Glaciares*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago, Chile. Available at http://www.conama.cl/portal/1301/articles-45467_PoliticaGlaciares.pdf (Last accessed: December 2009)

Cortés, A.E. (2010). *Determinación de un índice de sustentabilidad de cuencas (WSI) para la cuenca hidrográfica del río Elqui (Cuenca HELP-UNESCO)*. MSc Thesis, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

Debels, P., Szlafsztein, C., Aldunce, P., Neri, C., Carvajal, Y., Quintero-Angel, M., Celis, A., Bezanilla, A. and Martínez, D. (2008). IUPA: a tool for the evaluation of the general usefulness of practices for adaptation to climate change and variability. *Natural Hazards* **50** (2), 211 - 233

Espejo, L., Kretschmer, N., Oyarzún, J., Meza, F., Núñez, J., Maturana, H., Soto, G., Oyarzo, P., Garrido, M., Suckel, F., Amézaga, J. and Oyarzún, R. (2012). Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semi-arid North Central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment* **184** (9), 5571-5588

Galleguillos, G. (2004). *Efectos de la Actividad Minera y de las obras hidráulicas en la calidad de las aguas del Río Elqui y de sus afluentes*. Memoria de Título, Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, La Serena, Chile

Galleguillos, G., Oyarzún, J., Maturana, H. and Oyarzún, R. (2008). Retención de arsénico en embalses: el caso del río Elqui, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México* **23**, 29 - 36

Guevara, S., Oyarzún, J. and Maturana, H. (2006). Geoquímica de las aguas del río Elqui y de sus tributarios en el período 1975-1995: Factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu, y As. *Agricultura Técnica (Chile)* **66** (1), 57 - 69

Hezri, A.A. and Hassan, M.N. (2006). Towards sustainable development? The evolution of environmental policy in Malasia. *Natural Resources Forum* **30** (1), 37 - 50

Higueras, P., Oyarzún, R., Oyarzún, J., Maturana, H., Lillo, J. and Morata, D. (2004). Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. *Applied Geochemistry* **19** (11), 1855 - 1864

Hooper, B. (2010). River basin organization performance indicators: Application to the Delaware River basin commission. *Water Policy* **12**, 461 - 478

INE (2007). *Censo agropecuario*. Instituto Nacional de Estadística, Santiago, Chile. Available at: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censo_agropecuario_07.php (Last accessed: November 2009).

INE (2009). *Estadística demográfica*. Instituto Nacional de Estadística, Santiago, Chile. Available at: www.ine.cl (Last accessed: November 2009)

INN (1987). *Norma Chilena Oficial, Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos (NCh133.Of78)*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

Jannas, R.R., Bowers, T.S., Petersen, U. and Beane, R.E. (1999). High -sulfidation deposit types in the El Indio district, Chile. *Society of Economic Geologists, Special Publication* **7**, 27 - 59

Kalthoff, N., Fiebig-Wittmaack, M., Meibner, C., Kohler, M., Uriarte, M., Bischoff-Gaub, I. and Gonzales, E. (2006). The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *Journal of Arid Environment* **65** (3), 420 - 443

Ledoux, L., Mertens, R. and Wolff, P. (2005). EU sustainable development indicators: An overview. *Natural Resources Forum* **29** (4), 392 - 403

Llanca, J.C. y Miranda, E.E. (2003). *Estudio de agua subterránea en la cuenca del río Elqui*. Memoria de Título Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, La Serena, Chile

Lee, Y.J. and Huang, C.M. (2007). Sustainability index for Taipei. *Environmental Impact Assessment Review* **27** (6), 505 - 521

Lostarnau, C., Oyarzún, J., Maturana, H., Soto, G., Señoret, M., Soto, M., Rötting, T.S., Amézaga, J.M. and Oyarzún, R. (2011).



- Stakeholder participation within the public environmental system in Chile: Major gaps between theory and practice. *Journal of Environmental Management* **92** (10), 2470 - 2478
- Machinea, J.L., Barcena, A. and Leon, A. (2005). *Objetivos de Desarrollo del Milenio: una mirada desde America Latina y el Caribe*. CEPAL, Santiago, Chile
- Molle, F. and Mollinga, P. (2003). Water poverty indicators: Conceptual problems and policy issues. *Water Policy* **5**, 529 - 544
- OECD (2003). *OECD environmental indicators: development, measurement and use*. Organization for Economic Cooperation and Development. Paris, France.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. and Oyarzun, J. (1998). Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita* **33** (6), 547 - 559
- Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J. and Maturana, H. (2004). Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs. geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration* **84** (2), 53 - 64
- Oyarzun, R., Guevara, S., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. and Higuera, P. (2006). The As-contaminated Elqui river basin: a long lasting perspective (1975–1995) covering the initiation and development of Au–Cu–As mining in the high Andes of northern Chile. *Environmental Geochemistry and Health* **28** (5), 431-443
- Oyarzun, J., Maturana, H., Paulo, A. and Pasieczna, A. (2003). Heavy metals in stream sediments from the Coquimbo Region (Chile): Effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid Andean basin. *Mine Water and Environment* **22**, 155 - 161
- Paskoff, R. (1993). *Geomorphology of Semiarid Chile*. Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Perlack, R.D., Ensminger, T. and Martínez, R. (2001). Guatemala strives for environmental and economic sustainability in the Rio Dulce Region. *Natural Resources Forum* **25**, 235 - 244
- Saravanan, V.S., McDonald, G.T. and Molling, P.P. (2009). Critical review of integrated water resources management: moving beyond polarised discourse. *Natural Resources Forum* **33** (3), 76 - 86
- Squeo, F., Arancio, G. and Gutierrez, J. (2002). *Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo*. Universidad de La Serena, Corporación Nacional Forestal y Gobierno Regional de Coquimbo. La Serena, Chile.
- Sullivan, C.A. Meigh, J.R., Giacomello, A.M., Fediw, T., Lawrence, P., Samad, M., Mlote, S., Hutton, C., Allan, J.A., Schulze, R.E., Dlamini, D.J.M., Cosgrove, W., Delli Priscoli, J., Gleick, P., Smout, I., Cobbing, J., Calow, R., Hunt, C., Hussain, A., Acreman, M.C., King, J., Malomo, S., Tate, E.R., O'Regan, D., Milner, S. and Steyl, I. (2003). The Water Poverty Index: Development and application at the community scale. *Natural Resources Forum* **27** (3), 189 - 199
- UNDP (1994). *Informe sobre el Desarrollo Humano*. Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo y Fondo Cultura Economica FCE, México
- UNDP (2003). *Las trayectorias del desarrollo humano en las comunas de Chile (1994-2003)*. Temas de desarrollo humano sustentable N° 11, Santiago, Chile
- UNESCO (2008). *Evaluación objetiva de la aplicación y cálculo del Índice de Sostenibilidad de Cuenca en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá*. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 12
- UNESCO (2010). *Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina*. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 27. Available at: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/ihp/ihp-programmes/help/> (Last accessed: May 2011)
- WHO (2008). *Guidelines for Drinking-Water Quality*. World Health Organization. Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq (Last accessed: December 2008)



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Magíster en

INGENIERÍA GEOTÉCNICA

PROGRAMA DE POSTGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

El programa de Magíster en Ingeniería Geotécnica MIG tiene como objetivo formar especialistas capaces de evaluar la aplicabilidad de soluciones existentes a los problemas de Ingeniería Geotécnica y de no ser éstas aplicables, desarrollar soluciones nuevas. Con ello el MIG viene a satisfacer la demanda existente en el sector público y privado de profesionales altamente calificados.

La modalidad del programa es académica, cubriendo un conjunto de cursos obligatorios y optativos más una tesis de investigación. La realización de la tesis requiere de la dedicación exclusiva del alumno(a) con el fin de que el resultado del trabajo de tesis constituya un aporte significativo al desarrollo de la Ingeniería Geotécnica en cualquiera de sus áreas.

El programa de MIG está pensado para Ingenieros Civiles y Geólogos con buen rendimiento académico y buen nivel de comprensión de lectura técnica en idioma inglés.

Se invita cordialmente a los interesados a postular. Para ello completar el formulario de postulación, enviar curriculum vitae de no más de tres hojas, dos referencias, certificado de notas y certificado de título **antes del 1 de Marzo** (primer semestre) y **antes del 1 de Julio** (segundo semestre) a:

Programa de Magíster en Ingeniería Geotécnica - Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Católica de la Santísima Concepción - Alonso de Ribera 2850 - Casilla
297 Concepción - Chile.

**Para mayores antecedentes visite nuestra página www.civil.ucsc.cl
Consultas al teléfono: 56 41 2345303 o al email: mariellagarcia@ucsc.cl**



Relación de la variación del almacenamiento de agua local y el gravímetro superconductor en el Observatorio Geodésico TIGO, Concepción, Chile

Relationship of local water storage variations and superconducting gravimeter data at the Geodetic Observatory TIGO, Concepción, Chile

Fecha de entrega: 6 de septiembre 2012

Fecha de aceptación: 10 de diciembre 2012

Ghislaine Rossel¹, Andreas Güntner², Benjamin Creutzfeldt², Hartmut Wziontek³, Thomas Klügel³, Pedro Tume⁴, Mauricio Villagrán⁵, Theresa Blume² y Hayo Hase^{3,6}

¹ Ingeniería Operacional y Gestión de Redes, ESSBIO, Pedro Aguirre Cerda 1129, Piso 2, Concepción, Chile, ghislaine.rossel@essbio.cl

² Helmholtz-Centre Potsdam - German Research Centre for Geosciences GFZ, Telegrafenberg14473 Potsdam, Germany, guentner@gfz-potsdam.de, benjamin.creutzfeldt@gfz-potsdam.de, blume@gfz-potsdam.de

³ Federal Agency for Cartography and Geodesy BKG, Richard-Strauss-Allee 11 - 60598 Frankfurt Main, Germany, hartmut.wziontek@bkg.bund.de, kluegel@fs.wetzell.de

⁴ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile, ptume@ucsc.cl

⁵ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile, mvillagran@ing.puc.cl

⁶ Observatorio Geodésico TIGO, Camino Einstein km 2.5, Universidad de Concepción, Casilla 4036, Correo 3 Concepción, Chile, hayo.hase@tigo.cl

Los gravímetros superconductores SGs miden variaciones temporales del campo de gravedad de la Tierra con alta precisión, y han sido usados tradicionalmente en aplicaciones geodésicas. Recientes estudios han mostrado que el componente de disturbio de la señal en las series de tiempo del SG puede ser usado inversamente como un sensor hidrológico-sensible a cambios en las masas de agua a su alrededor. Los SGs proveen mediciones únicas de variaciones totales de almacenamientos de agua, suma de la variación en almacenamientos de nieve, suelo no saturado y agua subterránea, para escalas locales de varios cientos de metros de distancia. En este estudio se investigó la relación entre la hidrología local y la gravedad para el sensor SG ubicado en el Observatorio Geodésico Integrado Transportable TIGO en Concepción, Chile. Las series de tiempo del SG son comparadas con la respuesta gravimétrica calculada por un modelo geodésico usando mediciones de humedad del suelo hasta 2.6 m de profundidad y un Modelo de Elevación Digital para un radio de 2 km alrededor del SG. Los resultados muestran que la variación de humedad y la respuesta gravimétrica están relacionadas con la topografía y profundidad de análisis. La variación estacional de la gravedad es de hasta 12 μGal , indicando que la importancia de la variación de los almacenamientos de agua está en la profundidad de la zona no saturada y en las aguas subterráneas.

Superconducting gravimeters SGs measure temporal variations of the Earth's gravity field with high precision. SGs have traditionally been used in geodetic applications. Recent studies, however, have shown that the disturbing signal component in SG time series can inversely be used as a hydrological sensor. Being sensitive to water mass changes in their surroundings, SGs provide unique measurements of total water storage variations, sum of storage variations in the snow cover, the unsaturated soil, and the groundwater, at local scales of several hundreds of meters. In this study, the relationship between local hydrology and gravity for the SG located at the Geodetic Observatory TIGO in Concepción, is investigated. SG time series are compared to the gravimetric response calculated by a geodetic model using soil moisture measurements to a depth of 2.6 m and a Digital Elevation Model for an area of 2 km around the SG. The results show that variations in moisture and gravimetric response are related to the topography and depth of analysis. Seasonal gravity variations of up to 12 μGal give indication of important water storage variations, which are related to the depth of unsaturated zones and groundwater.

Palabras clave: gravímetro superconductor, señal de disturbio, almacenamiento de agua, respuesta gravimétrica

Keywords: superconducting gravimeter, disturbing signal, water storage, gravimetric response



Introducción

La relación entre la hidrología y la gravedad está atrayendo cada vez más la atención de las ciencias hidrológicas y geodésicas. Desde una perspectiva hidrológica la estimación del almacenamiento de agua y la variación espacio-temporal es importante porque permite cuantificar balances de agua para el uso y manejo efectivo del recurso. Las mediciones directas de las variaciones de los almacenamientos de agua son una tarea difícil, ya que se realizan en puntos específicos y están asociadas a un alto nivel de incertidumbre. Por lo que las observaciones de gravedad se están convirtiendo en una promisorio herramienta ya que la permanente observación gravimétrica podría llegar a proveer de gran información sobre el cambio de estos sistemas. Desde la perspectiva geodésica el efecto de la gravedad hidrológica local interfiere en la señales adhiriendo alteraciones a las mediciones gravimétricas debido a que la precisión de las mediciones de gravedad in situ se ven afectadas por las variaciones de almacenamientos de agua, ya sean las aguas subterráneas, humedad del suelo, agua almacenada en la superficie, etc., las cuales deben ser eliminadas desde los registros gravimétricos.

Según Creutzfeldt *et al.* (2008), Bonatz en el año 1967 fue el primero en estudiar la relación entre hidrología y gravedad a través de la simulación del efecto de la humedad del suelo sobre las mediciones de gravedad, concluyendo que no era útil para la aplicación geodésica, ya que era necesario el desarrollo de gravímetros de alta precisión porque la humedad del suelo puede contribuir a la señal gravimétrica en el rango de 10 mGal. Sin embargo, más adelante fueron desarrollados gravímetros de mayor precisión como por ejemplo el gravímetro superconductor SG. Estos gravímetros relativos son de alta precisión con mediciones de resolución de 0.01 μ Gal, pero debido a alteraciones atmosféricas o de origen sísmico su precisión disminuye a rangos entre 0.1 a 1 μ Gal (Creutzfeldt *et al.*, 2008).

Para trasladar los cambios de los almacenamientos de agua a cambios en la gravedad, actualmente se han implementado variados modelos dependiendo del sistema en estudio. Generalmente se usan prismas rectangulares para la obtención de la topografía y el subsuelo (Hasan *et al.*, 2006). También existen otros modelos usados como segmentos esféricos o polígonos 3D TINs. Estos modelos

permiten el cálculo exacto de las variaciones gravimétricas producto de las variaciones en los almacenamientos de agua considerando la topografía y la distribución espacial de las masas (Creutzfeldt *et al.*, 2008). Intentando hacer más eficiente los métodos en relación al tiempo de procesamiento y la precisión, Leirião (2007) propone el uso de diferentes modelos para diferentes áreas de influencia alrededor del gravímetro. Para el área más cercana alrededor del gravímetro usa la ecuación del prisma que integra completamente cada volumen de elemento, para reducir el tiempo computacional usa la ecuación de punto masa para distancias largas y para distancias intermedias usa la ecuación de MacMillan.

Para investigar cómo influye la topografía y la precisión de los modelos de elevación digital DEM en el cálculo de la gravedad, cómo influyen los diferentes componentes de almacenamiento en la señal gravitacional y cómo varía el radio de influencia para cada componente, Creutzfeldt *et al.* (2008) aplica un modelo 4D usando como ejemplo el SG del *Geodetic Observatory Wettzell* en Alemania. Se evalúa la posible máxima influencia de las variaciones de agua de todos los componentes hidrológicos y se analiza la influencia real de los datos hidrológicos sobre las mediciones del SG, demostrando que entre el 52% y el 80% de la señal hidrológica local de la gravedad es generada en un radio de 50 m alrededor del gravímetro superconductor SG. Aproximadamente el 90% de la señal es generada en un radio de influencia de 1000 m alrededor del gravímetro SG.

Otros estudios se han enfocado en la combinación de modelos hidrológicos espaciales semi-distribuidos y observaciones de gravedad. Hasan *et al.* (2008) calibra conjuntamente un modelo de humedad del suelo y un modelo de almacenamiento en pendiente de Boussinesq, para la escorrentía de aguas subterráneas y la señal de gravedad in situ, respectivamente. Creutzfeldt *et al.* (2010), centran su atención en un pequeño radio de influencia cercano al gravímetro donde las variables hidrológicas y su efecto sobre la gravedad son más pronunciadas en la profundidad que en el área. Debido a esto resuelven las variables de profundidad en un enfoque 1D centrándose separadamente en cada componente de almacenamiento y calculan la respuesta gravimétrica de la variación del almacenamiento y las comparan con los datos del SG.

Basándose en este estudio se investiga la relación entre la hidrología y la gravedad, donde se evalúa la influencia de la variación del contenido de humedad del suelo en las mediciones gravimétricas del Observatorio Geodésico Integrado Transportable TIGO.

Datos y metodología

Los datos para este estudio fueron obtenidos por el Observatorio TIGO ubicado sobre un cerro, en Camino Einstein km 2.5, Concepción, Chile, con coordenadas geográficas 36°50.568'S, 73° 1.513'O, y altura 160 m sobre el nivel medio del mar (ver Figura 1). TIGO está gestionado por el BKG (*German Federal Agency for Cartography and Geodesy*) en colaboración con la Universidad de Concepción. La zona en estudio se caracteriza por tener precipitaciones medias anuales de 1500 mm, presentar una evapotranspiración potencial promedio anual de 1420 mm y una temperatura media anual de 12°C. Los parámetros climáticos de relevancia hidrológica, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación, presión atmosférica, son medidos por TIGO, y el período de estudio corresponde a enero del año 2006 hasta enero 2011.



Figura 1: Ubicación observatorio TIGO, imagen satelital obtenida de Google Earth

El área alrededor de la estación donde se encuentra emplazado el gravímetro es rural, predominando bosques, con una topografía accidentada. El suelo es caracterizado a través de muestras a diferentes profundidades, las cuales se dividieron en sub muestras para determinar así la humedad y la granulometría, esta última se obtiene por medio de tamizaje húmedo, para separar las arenas, y por el método de pipeta, para limos y arcillas.

Luego por medio del triángulo textural USDA (Davis y Bennett, 1927), se procedió a la clasificación del suelo en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación del suelo

Parámetros	unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Profundidad	m	0.6	0.9	1.2
Arena	%	22	25	23
Limo	%	54	49	63
Arcilla	%	24	26	14
Descripción		Franco limosa	Franco	Franco limosa

Basándonos en los resultados de la Tabla 1, es posible clasificar el suelo en el área circundante al gravímetro SG38, como suelo Franco limoso a los 0.6 m, Franco a los 0.9 m y Franco limoso a los 1.2 m. La humedad del suelo fue determinada por 5 sensores del tipo sondas TDR (*Time Domain Reflectometry*) Tipo Trime-EZ instalados por BKG a 0.15, 0.40, 0.8, 1.4 y 2.2 m de profundidad, ubicados a 3 m desde la estructura donde se encuentra ubicado el gravímetro. Tomando como base los resultados de la clasificación del suelo y la ubicación de los sensores, el suelo en su profundidad se divide en distintas zonas, de 0.0 -0.2 m, 0.2 - 0.6 m, 0.6 - 1.0 m, 1.0 -1.8 m y 1.8 - 2.6 m, asumiendo representativo una de las sondas por cada zona.

Humedad del suelo

Los datos de humedad del suelo son registrados cada 20 min, cada serie de tiempo fue inspeccionada visualmente a través de gráficos, quitando de esta manera los errores e incertidumbres. Dos sensores presentaron errores en la toma de sus datos a partir del término del primer año. Es por ello que estos datos fueron reemplazados para los años posteriores con datos de los sensores con mayor correlación en el período de medida común. A continuación la Figura 2 muestra las variaciones temporales de humedad del suelo en cada sensor, los períodos de mayor humedad corresponden a los meses de invierno, los que a su vez son los más lluviosos. La mayor variación, es decir, la diferencia entre la menor y mayor humedad registrada, se presenta en el primer sensor a 0.15 m, esto se debe a que la lluvia caída al suelo filtra más rápidamente a las capas superiores.

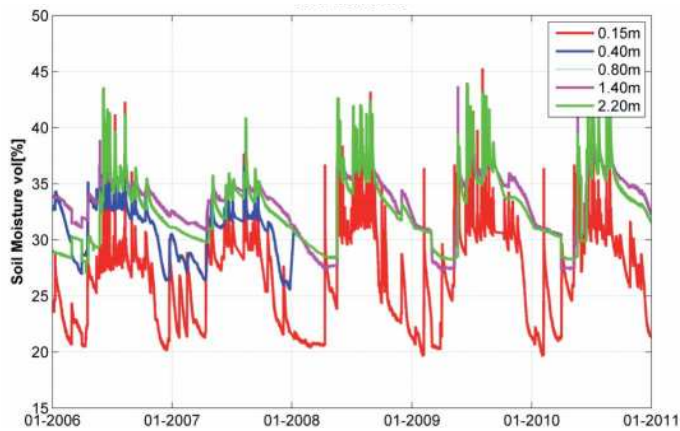
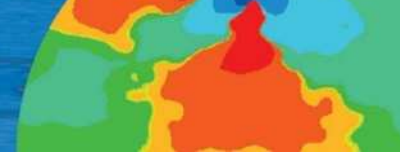


Figura 2: Variación de la humedad en el suelo de cada sensor, la línea roja corresponde al sensor a 0.15 m, la línea azul al sensor a 0.4 m, la línea celeste al sensor a 0.6 m, la línea magenta al sensor a 1.4 m y la línea verde al sensor a 2.2 m.

Gravímetro

Los gravímetros son instrumentos que realizan mediciones correspondientes a la variación espacial de la fuerza de gravedad, sin embargo, existen gravímetros de alta resolución y estabilidad, que son capaces de medir variaciones temporales de esta fuerza. En este estudio los datos de variación temporal de la fuerza de gravedad son obtenidos por el gravímetro superconductor SG38 en combinación con el gravímetro absoluto FG5-227. El gravímetro se encuentra ubicado sobre una estructura que tiene 6.2 x 3.5 m (largo x ancho) y está 0.25 m sobre el nivel del suelo. Los datos se encuentran disponibles a partir de enero del año 2006 hasta enero del 2011 y fueron recogidos en intervalos de una hora (TIGO 2011). En la Figura 3 se presentan los valores de gravedad residual, los cuales corresponden a los datos gravimétricos del SG, corregidos por los efectos no hidrológicos, por ejemplo mareas terrestres, mareas oceánicas y cambios de la masa atmosférica. Para el periodo 07/2008-12/2009, debido a la refacción del SG, la serie de tiempo de gravedad residual fue reconstruida por mediciones semanales de un gravímetro absoluto (FG5-227) efectuado en el mismo lugar.

Respuesta gravimétrica

La respuesta gravimétrica de la variación de humedad en el suelo (zona no saturada) será determinada mediante la ecuación de MacMillan (Leirião, 2007; Creutzfeldt *et al.* 2008).

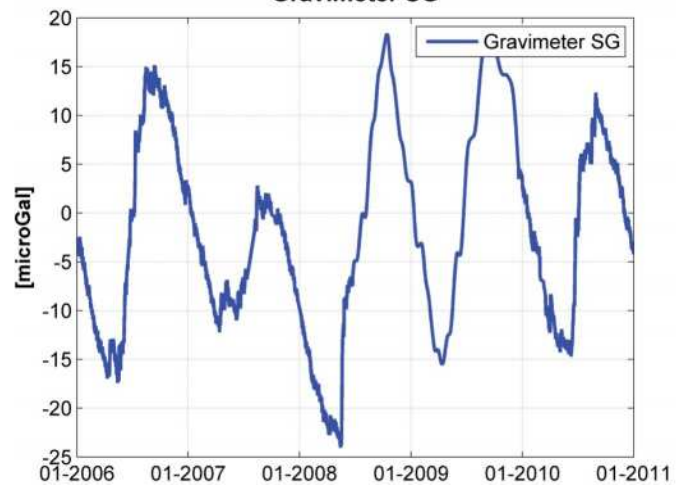


Figura 3: Serie de tiempo, variación de las mediciones gravimétricas, gravímetro SG38

El modelo para simular la respuesta gravimétrica es codificado en MATLAB, basado en la ecuación de MacMillan, donde la componente z del cambio de gravedad, debido a la homogeneidad de las variaciones de almacenamientos de agua, es calculada para cada cuerpo y el efecto total de la gravedad se obtiene de la suma de los cambios de gravedad en cada cuerpo elemental.

$$\Delta g = G\Delta\rho\Delta x\Delta y\Delta z \left[-\frac{z}{d^3} - \frac{5}{24} \frac{(\alpha x^2 + \beta y^2 + \omega z^2)z}{d^7} + \frac{1}{12} \frac{\omega z}{d^5} \right] \quad (1)$$

Con $\alpha = 2\Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$, $\beta = -\Delta x^2 + 2\Delta y^2 - \Delta z^2$, $\omega = -\Delta x^2 - \Delta y^2 + 2\Delta z^2$, y $d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, donde (x, y, z) es el centro de las coordenadas de un cuerpo elemental, relativo al sensor (m), Δx , Δy , Δz , son las longitudes de los lados de la celda $\Delta xy = \Delta x = \Delta y$ (m), G es la constante de gravitación universal ($6.673 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$) y $\Delta\rho$ es el cambio de densidad.

El efecto de la variación de la humedad en el suelo es calculado asumiendo una variación homogénea en el cambio de densidad, aunque la variación de humedad en el suelo respecto a la profundidad y superficie son equivalentes a cambios en el nivel de agua. El cambio de densidad no se distribuye en forma heterogénea en cada cuerpo; sin embargo, este error de simplificación se puede minimizar reduciendo el espesor de las líneas en el modelo.

Para reducir el error de aproximación de la ecuación de MacMillan en el área cercana al gravímetro, se realiza una discretización anidada en el dominio del modelo

presentada por Creutzfeldt *et al.* (2008), la cual permite una mayor resolución en la zona próxima al centro del DEM; la resolución de 0.25 m, 2.5 m y 10 m de los DEM variará con el radio del dominio para $R = 50$ m, $R = 500$ m y $R = 2000$ m, respectivamente. Esto se realiza para el área de un cuadrado de lado 4 km, con el gravímetro SG38 ubicado en el centro. El uso de un DEM es necesario para distribuir las variaciones de humedad del suelo en la topografía. La Figura 4 muestra la extensión espacial total de la discretización anidada del dominio del modelo, donde R corresponde a la mitad de la longitud del lado del cuadrado del dominio y Δxy es el tamaño de la celda que varía con el dominio R , las zonas verdes corresponden a las mayores alturas y las zonas café a las menores altura, el gravímetro SG38 se ubica al centro.

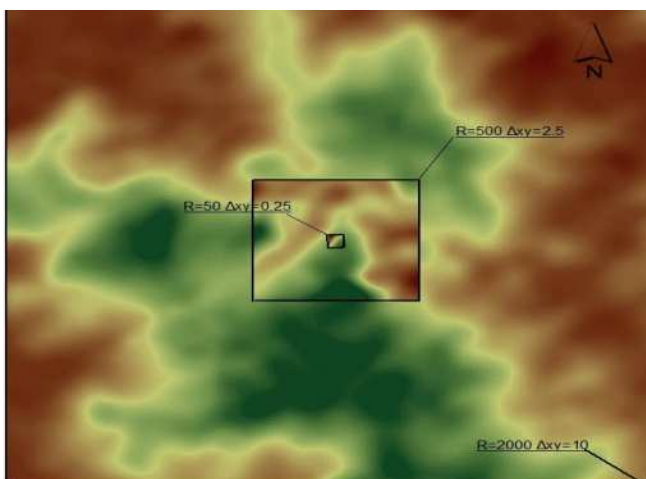


Figura 4: Extensión espacial total de la discretización anidada del dominio del modelo.

La influencia de las masas hidrológicas sobre el sensor gravimétrico será estimada asumiendo un máximo cambio hipotético basado en condiciones de borde reales. En este caso se considera el efecto de la estructura donde se encuentra el gravímetro, se supondrá que no existe infiltración bajo ella. Las respuestas gravimétricas obtenidas de la humedad del suelo serán comparadas con las mediciones obtenidas por el gravímetro SG38.

Resultados

Los datos de humedad del suelo están disponibles hasta los 2.6 m de profundidad; sin embargo, la zona de almacenamiento de humedad alcanza mayores profundidades, por lo mismo se realiza el análisis,

también, suponiendo que la humedad del sensor presente a los 2.2 m, es constante hasta los 20 m. Los espesores de capa del suelo son de 0.1 m hasta los 2.6 m, y desde ahí se consideran líneas de espesor de 1 m hasta los 20 m. En la Tabla 2 se muestran los resultados asumiendo un cambio de densidad de 1000 kg/m^3 en cada horizonte.

Tabla 2: Respuesta gravimétrica en μGal , a diferentes radios R y diferentes profundidades

Horizonte	Respuesta 10^{-2} m/s^2			
	R = 50 m	R = 500 m	R = 2000 m	Resp.grav.total
0.0 - 0.2 m	1.0944	0.9607	0.1786	2.2337
0.2 - 0.6 m	1.7729	0.9845	0.1807	2.9381
0.6 - 1.0 m	2.2814	1.0082	0.1829	3.4725
1.0 - 2.6 m	3.2369	1.1018	0.1916	4.5363
2.6 - 10 m	33.9774	14.8091	2.2944	51.0809
10 - 20 m	26.3847	19.3519	2.8363	48.5729

La respuesta gravimétrica es mayor en el área cercana al gravímetro $R = 50$ m, luego disminuye a medida que aumenta el radio R , es por ello que esta área es la de mayor influencia en la respuesta total.

La distribución espacial de la variación gravimétrica se muestra en la Figura 5 para el área completa, al centro se ubica la estructura donde se encuentra el gravímetro y la variación de masas es 0, los valores negativos corresponden a las zonas rojas, las que están asociadas a los puntos de mayor altura, es decir, sobre el gravímetro SG38.

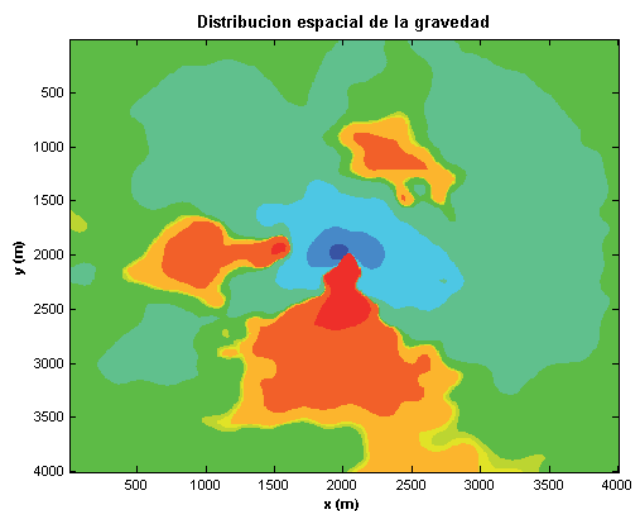


Figura 5: Distribución espacial de la variación gravimétrica para $R = 2000$ m

La distribución espacial de la variación gravimétrica para los diferentes radios con su respectiva resolución, se muestra en las Figura 6, donde el cuadro amarillo ubicado en el centro de $R = 50$ m, corresponde a la casa gravimétrica donde está ubicado el SG y la variación de masas es 0.

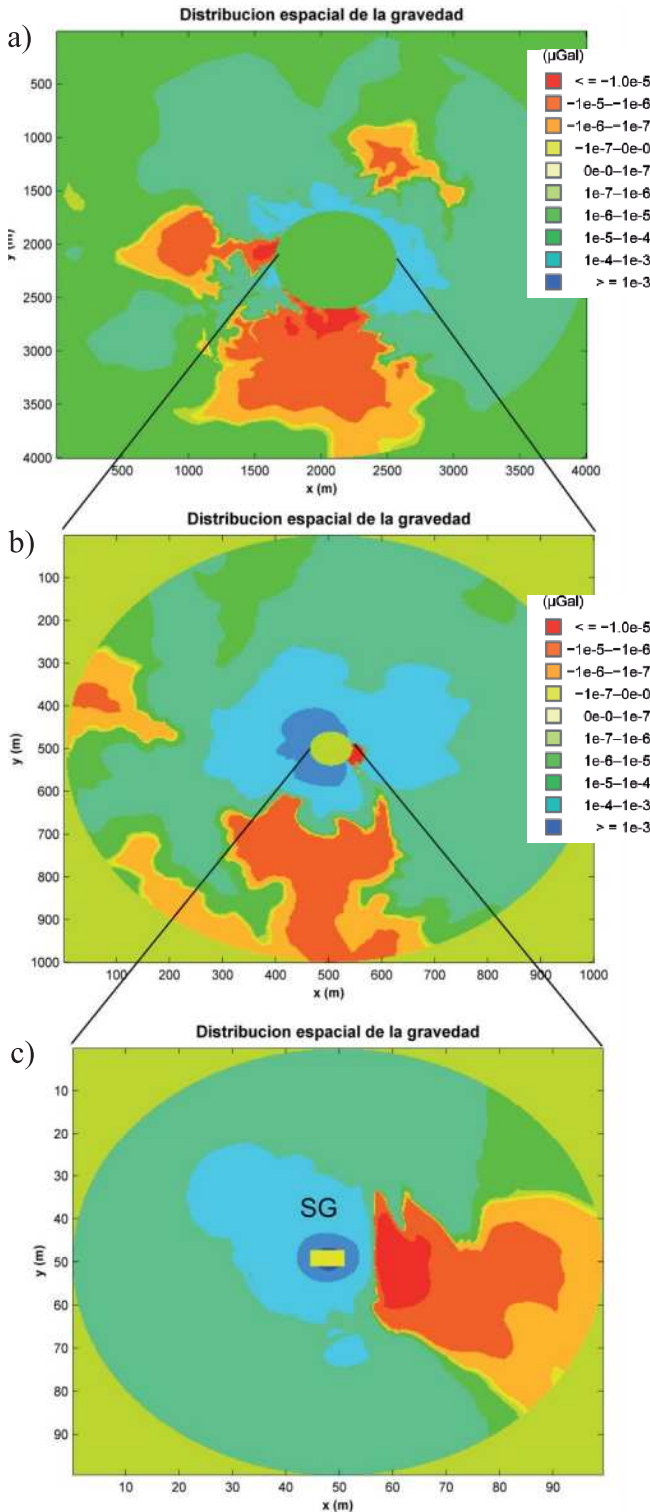


Figura 6: Distribución espacial de la variación gravimétrica, para los diferentes radios, R: a) 2000 m, b) 500 m y c) 50 m.

Considerando las condiciones reales determinadas por la humedad medida en cada sensor, se obtiene la respuesta gravimétrica en el período desde enero 2006 hasta enero 2011, para una profundidad de análisis de hasta 2.6 m (Figura 7). Los valores de la respuesta son mayores cuando aumenta la profundidad.

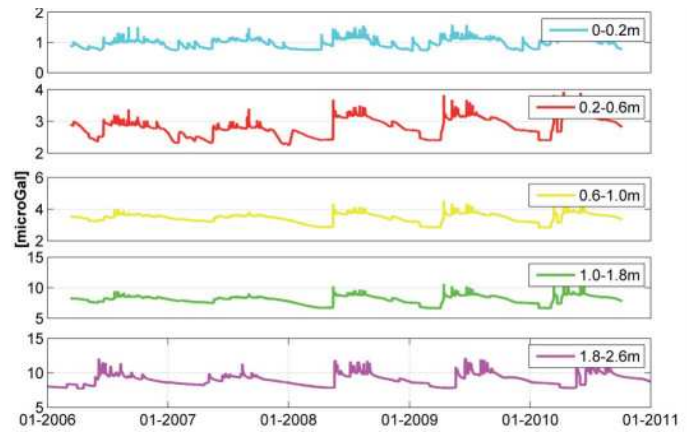


Figura 7: Respuesta gravimétrica de los diferentes horizontes

Sumando las respuestas gravimétricas de cada horizonte, se obtiene la respuesta total de la variación de la humedad en el suelo, ver Figura 8.

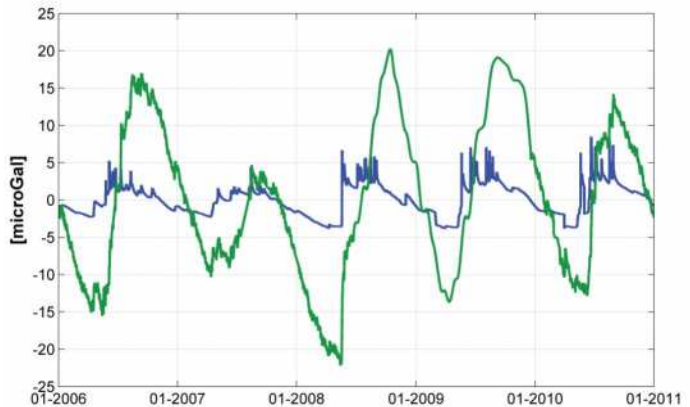


Figura 8: Respuesta gravimétrica hasta 2.6 m (línea azul) y gravedad residual SG38 (línea verde)

La respuesta gravimétrica de la humedad del suelo hasta los 2.6 m deja gran parte de la gravedad residual del SG sin ser explicada. Luego se aumenta la profundidad de análisis hasta los 20 m de profundidad considerando la humedad en la zona no saturada a los 2.2 m constante hasta los 20 m, la respuesta gravimétrica aumenta (Figura 9), sin embargo, no explica el total de la respuesta.

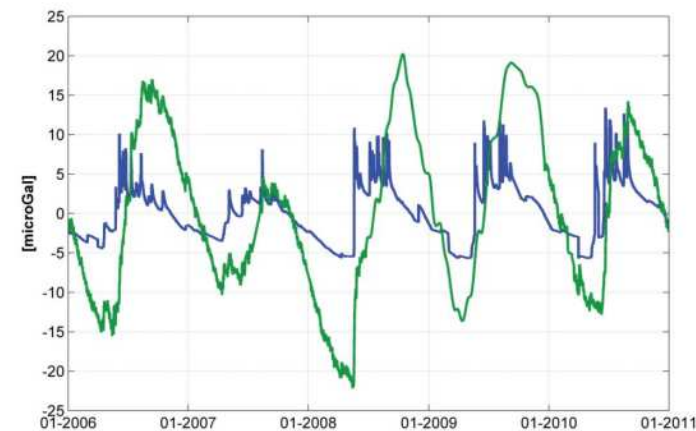


Figura 9: Respuesta gravimétrica hasta 20 m (línea azul) y gravedad residual SG38 (línea verde)

Para determinar el ajuste del modelo se realiza un análisis de regresión lineal del tipo mínima desviación absoluta (*Least Absolute Deviation*) considerando una profundidad de análisis de 2.6 m (Tabla 3), y luego considerando una profundidad de hasta 20 m (Tabla 4). Luego se calcula la correlación por rangos entre las variables para ambas profundidades (Tabla 5).

Tabla 3: Coeficiente de regresión de un modelo de regresión lineal simple, para una profundidad de hasta 2.6 m

Variable	Coefficiente	Desv. típica	p* <
Constante	0.20	0.04	0.001
Resp. gravimétrica 2.6 m	3.88	0.02	0.001

* nivel de significancia

Tabla 4: Coeficientes de regresión de un modelo de regresión lineal simple, para una profundidad de hasta 20 m

Variable	Coefficiente	Desv. típica	p* <
Constante	0.43	0.04	0.001
Resp. gravimétrica 20 m	2.47	0.02	0.001

* nivel de significancia

Tabla 5: Coeficiente de rango de correlación que existe entre la medición entregada por el SG38 y la respuesta de gravimétrica de la humedad del suelo.

Profundidad, m	Coef. Correlación	p* <
2.6	0.66	0.001
20	0.67	0.001

* nivel de significancia

Al determinar el error absoluto medio de cada modelo de

regresión lineal, se puede observar en la Tabla 6 que el modelo, considerando una profundidad de análisis de 20 m, mejora muy poco el ajuste.

Tabla 6: Error medio absoluto (MAE) de los modelos de regresión lineal

Modelo	MAE (μGal)
Respuesta gravimétrica 2.6 m	3.80
Respuesta gravimétrica 20 m	3.40

La gráfica de la curva de gravedad residual es más suave que la gráfica de la respuesta gravimétrica al observar las Figuras 8 y 9, lo cual es otro indicador. La gran parte de la señal del SG que queda sin ser explicada a partir del cálculo de la respuesta gravimétrica, indicaría la falta de componentes por incluir. Sin embargo, la respuesta gravimétrica obtenida del modelo y la gravedad residual del SG muestran similar variación estacional, debido a las condiciones climáticas locales, las variaciones estacionales de la respuesta gravimétrica son de hasta 12 μGal, para 2.6 m de profundidad.

Conclusiones

Al comparar los resultados de la respuesta gravimétrica con las mediciones gravimétricas entregadas por el gravímetro superconductor SG38, aunque presentan similitud en la variación estacional, podemos ver que existe una gran diferencia. Al aumentar la profundidad hasta los 20 m, considerando la humedad del sensor ubicado a 2.2 m, el resultado mejora levemente lo cual puede ser un indicador de que la diferencia entre la respuesta gravimétrica de la humedad del suelo y las mediciones del gravímetro superconductor SG38 se puede deber a variaciones dinámicas en la humedad del suelo o a la existencia de otros componentes involucrados que no fueron considerados. Por lo tanto, sería recomendable hacer mediciones y obtener las variaciones del contenido de agua en el suelo a profundidades mayores a los 2.6 m, incluyendo variaciones de la napa freática.

Las curvas de los gráficos de gravedad residual provenientes del SG son mucho más suaves respecto a las curvas de los gráficos de respuesta gravimétrica, lo cual podría implicar una sobreestimación de la humedad en el modelo. Sin embargo, se debe considerar que la señal



gravimétrica del SG es una señal integrada que considera todos los almacenamientos, por lo tanto la falta de ajuste que presenta el modelo puede estar asociada a factores que no fueron considerados o a almacenamientos de humedad a mayor profundidad.

Son muchos los factores involucrados para obtener una respuesta precisa de las variaciones de humedad en el suelo, errores en las mediciones, hipótesis no precisas, variaciones espaciales que afectan la obtención de la respuesta gravimétrica, por lo que resulta difícil corregir las mediciones del gravímetro superconductor en base a las variaciones de humedad del suelo. Sin embargo, el uso de las mediciones de gravedad puede resultar de gran beneficio para la hidrología, ya que puede entregar información sobre los almacenamientos de agua, considerando que la señal del gravímetro es una señal integrada que considera todos los almacenamientos, es por ello que se debe ser muy cuidadoso, tanto en el manejo de los datos hidrológicos como en el manejo de los datos gravimétricos.

Referencias

Creutzfeldt, B., A. Güntner, T. Klügel, and H. Wziontek (2008). Simulating the influence of water storage changes on the superconducting gravimeter of the Geodetic Observatory Wettzell, Germany. *Geophysics* 73(6), WA95.

Creutzfeldt, B., Güntner, A., Thoss, H., Merz, B. and Wziontek, H. (2010). Measuring the effect of local water storage changes on in-situ gravity observations: Case study of the Geodetic Observatory Wettzell, Germany. *Water Resources Research* 46, W08531.

Davis, R.O.E. and Bennett, H.H. (1927). Grouping of soils on the basis of mechanical analysis. United States Department of Agriculture. Departmental circulation No. 419.

Hasan, S. (2009). *Terrestrial water storage change from temporal gravity variation* Ph.D. thesis, Wageningen University, Netherlands.

Hasan, S., Troch, P. A., Boll, J., and Kroner, C. (2006). Modeling the hydrological effect in local gravity at Moxa, Germany. *Journal of Hydrometeorology* 7(3), 346-354.

Leirião, S. (2007). Hydrological model calibration using ground based and spaceborne time-lapse gravity surveys. MSc thesis, Technical University of Denmark.

Tigo (2011): Observatorio Geodésico Integrado Transportable. Recuperado. Universidad de Concepción, octubre del 2011 de TIGO: <http://www.tigo.cl/>

INGENIERÍA CIVIL GEOLÓGICA



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Descripción ■

El ingeniero civil geólogo es un profesional con dominio teórico y práctico de las ciencias básicas, ciencias de la ingeniería y geología, con capacidad para aplicar teorías, principios y métodos en la formulación, diseño, proyección, gestión, desarrollo y evaluación de proyectos de ingeniería considerando condiciones y riesgos geológicos.

Para ello requiere interpretar adecuadamente los procesos geológicos en la búsqueda, evaluación, desarrollo y aprovechamiento de los ambientes y recursos naturales. Así mismo es capaz de proponer soluciones pertinentes a problemas de la sociedad desde la geotecnia, hidrología, prospección, ingeniería ambiental y manejo de recursos naturales. En el contexto de su formación, se busca formar un ingeniero competente, que destaque por su espíritu emprendedor, sus capacidades directivas y su actuar ético fundado en la antropología cristiana.

Áreas de estudio ■

Ciencias de la Ingeniería y Ciencias de la Geología
Geotecnia
Hidrología Aplicada
Prospección
Ingeniería Antisísmica
Ingeniería Medioambiental
Manejo de Riesgos Naturales
Desarrollo Responsable de Recursos
Formación Filosófica-Teológica

Ficha ■

Grado: Licenciado en Ciencias de la Ingeniería
Título: Ingeniero Civil Geológico
Duración: 11 semestres
Jornada: diurna
Sede: Campus San Andrés

Campo laboral ■

El Ingeniero Civil Geólogo puede desarrollar actividades en diversos ámbitos como: Industria minera, proyectos de Ingeniería Civil, recursos hidráulicos, Industria Energética, recursos alternativos de energía, protección del medio ambiente, proyectos de riesgos geológicos, proyectos geotécnicos, Investigación, entre otros.

Potenciales centros laborales: empresas del sector privado; ejercicio libre de la profesión; administración pública; centros de investigación, desarrollo e innovación; laboratorios de mecánica de suelos, rocas y sondajes; y prospección.

Para mayores antecedentes visite nuestra página www.civil.ucsc.cl/inggeo



Integración de las nuevas tecnologías en el manejo de las aguas subterráneas

Integration of new technologies to groundwater management

Fecha de entrega: 13 de enero 2012
Fecha de aceptación: 10 de octubre 2012

Armando Hernández, Eric Cabrera y Modesto Gómez

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Calle 114, núm. 11901 entre 119 y 127, Marianao, 19390, La Habana, Cuba, ahernandez@cih.cujae.edu.cu, ecabrera@cipp.minbas.cu, modesto@cih.cujae.edu.cu

Se muestran las características de la Plataforma Modular Integrada PMI, elaborada por uno de los autores para el manejo de los recursos hidráulicos subterráneos. Se vincula la adquisición automatizada de datos en tiempo real, el procesamiento sobre una plataforma SIG, el uso de modelos de simulación y las técnicas de optimización para la gestión óptima de acuíferos y operación automatizada de las obras de captación. Se presentan las características y experiencias de aplicación en la modelación de acuíferos cubanos con el software AQÜIMPE, basado en el método de elementos finitos y que utiliza el triángulo cuadrático como elemento de discretización, lo cual permite utilizar elementos volumétricos representativos en acuíferos cársticos, como medios porosos equivalentes. Se muestra el procedimiento utilizado en Cuba encaminado a evaluar los recursos hídricos subterráneos utilizando el modelo de simulación del acuífero. Del trabajo se concluye que la utilización de modelos de administración para definir políticas óptimas de explotación, una vez definidos los recursos de explotación con un modelo regional de flujo según horizontes de planeamiento, es necesario vincularlo a las obras de captación mediante refinamiento de mallas y factores que consideren los efectos locales dependientes del gasto específico. Como caso de estudio de implementación de la PMI y de las nuevas tecnologías que en ella se contemplan, se presentan los resultados de la aplicación en un acuífero costero que abastece a la ciudad de La Habana.

Palabras clave: acuíferos, modelación matemática, modelos de administración del agua subterránea, sistemas integrados para la gestión de acuíferos

Characteristics of the Modular Integrated Platform PMI, compiled by one of the authors, are shown for the management of groundwater resources. The automated data acquisition in real-time processing on a GIS platform, the use of simulation models and optimization techniques for optimal management of aquifers and automated operation of the headworks are linked. The characteristics and experiences of applications in modeling with the software AQÜIMPE in Cuban aquifers, are presented. AQÜIMPE is based on the finite element method using quadratic triangle as discretization element, allowing representative volumetric elements used in karstic aquifers, such as porous equivalents media. The procedure used in Cuba aimed at evaluating groundwater resources using the simulation model of the aquifer, is described. From this study, it is concluded that the use of management models to define optimal operating policies, once operating resources are defined with a regional model of flow as planning horizons, must link it to the headworks through mesh refinements and factors considering local effects dependent on specific flow use. As a case study, the implementation of the PMI and new technologies contemplated therein, are the results of the application in a coastal aquifer which supplies the city of La Havana.

Keywords: aquifers, mathematical modelling, groundwater administration model, integrated systems for managing aquifers

Introducción

En muchas regiones del mundo la principal fuente de abasto de agua la constituyen los sistemas acuíferos. En el caso particular de Cuba, la capital La Habana con una población alrededor de los 3 millones de habitantes, se abastece en un 99% de las aguas subterráneas.

Es usual en nuestro país que las empresas que se dedican al diseño, construcción, rehabilitación y operación de las redes de acueducto, utilicen los datos en cuanto a disponibilidad del recurso hídrico que otras empresas le suministran y en ocasiones prioricen garantizar la demanda actual sin preocuparse de lo que puede suceder con la fuente de abasto en un horizonte de planeamiento a largo plazo. Lo anterior puede conllevar a afectaciones graves en el suministro y a costos elevados al tener que utilizar fuentes y métodos de distribución alternativos.

En adelante se exponen algunas tecnologías de avanzada que permiten captar las bases de datos aportadas por diferentes métodos de estudio de las aguas subterráneas, procesarlas y suministrarlas a los sistemas informáticos para mediante la modelación matemática, integrarlas y obtener respuestas que permitan a los especialistas proponer soluciones a los tomadores de decisión para la definición de políticas de operación.

Plataforma modular integrada PMI para la gestión del agua subterránea como recurso

Hasta el presente, la aplicación conjunta de la modelación matemática, los sistemas de información geográfica y las tecnologías de control y supervisión de procesos en tiempo real, para el análisis y gestión de los sistemas de recursos hidráulicos, ha sido abordada de manera parcial. En este trabajo, se muestra la necesidad de emplear una Plataforma Modular Integrada PMI para la gestión del agua subterránea como recurso, basada en el empleo interrelacionado de estas herramientas. Dentro de los factores que favorecen la implementación de la plataforma propuesta y realizan una contribución a la gestión del agua subterránea se encuentran: la posibilidad de su instalación por etapas, su enfoque modular, la concepción de una base de datos única que posibilita el uso compartido de la información, y la utilización de diferentes esquemas de captación de las variables, todo ello articulado desde una supervisión centralizada del proceso, en tiempo real.

En Gómez (2009), se ejemplifica en dos casos de estudio la aplicación de la plataforma propuesta. Estos demuestran la validez del método de integración planteado y del empleo de la nueva versión del modelo matemático de simulación AQÜIMPE para el pronóstico de la política de explotación del recurso.

El diseño modular de la PMI permite establecer opciones para su implantación gradual que constituyen una vía factible de completamiento de las tareas de gestión de los recursos hidráulicos para las entidades encargadas de administrarlos. Esta concepción de implantación, no exige la aplicación total de todos los módulos de la PMI, desde el propio comienzo, sino que permite incorporar en cada etapa, nuevos elementos para la gestión, que complementan los precedentes, en función de los recursos disponibles para inversión.

La experiencia acumulada en la operación de sistemas hidráulicos y la premisa de realizar bajas inversiones que sean factibles de acometer por las entidades encargadas de su administración y representen una vía efectiva para obtener resultados progresivos en el control de los recursos hidráulicos, orientan los escalones a establecer en una secuencia como la que a continuación se detalla:

1- Calibración de los modelos matemáticos necesarios para la gestión de la operación, a partir de las bases de datos disponibles. Comienzo de la operación, basado en pronósticos realizados a través de los modelos de simulación del sistema (SIG+MM) con la toma de decisiones en tiempo diferido y entrada de datos no automatizada. Representa la fase que requiere la menor inversión. El procedimiento lógico de trabajo, esquematizado en la Figura 1, consiste esencialmente en la conformación del marco inicial de análisis para el establecimiento de las primeras Reglas de Operación RDO, que permanecen sin variación hasta la llegada de la nueva información de campo, momento en el que se actualiza el SIG y se ejecutan los modelos matemáticos para decidir las próximas RDO. La vía de captación de datos es la tradicional, por teclado.

2- La aplicación parcial de la PMI (SIG + MM + Sensores con Registradores de Variables) para operación y toma de decisiones en tiempo diferido con entrada de datos parcialmente automatizada se ilustra en la Figura 2. Representa el escalón intermedio en cuanto a alcance de la gestión y requerimientos de inversión. Se introduce,

adicionalmente, el modo de captación de datos de tiempo diferido, lo que permite actualizar de manera periódica la base de datos de la PMI a través de la ejecución del módulo WinRM y la descarga de las memorias de registro.

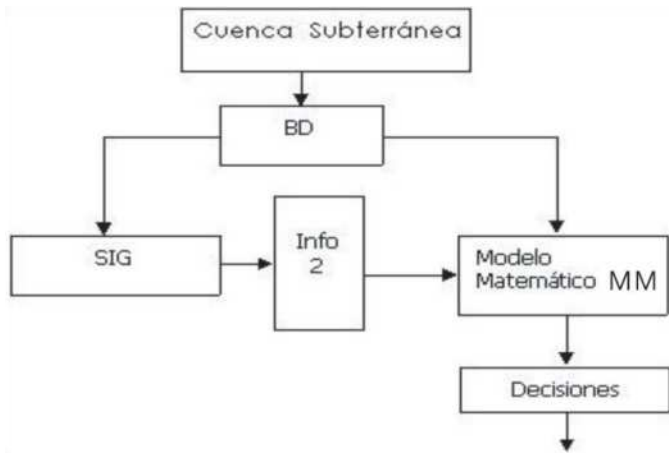


Figura 1: Procedimiento lógico de trabajo asociado con el Escalón No. 1

Mejora la base informativa y permite detectar a posteriori, irregularidades ocurridas en el cumplimiento de las RDO. Tanto en este escalón, como en el tercero, el procedimiento general de trabajo para la gestión de la cuenca, es controlado por el SGO (Supervisor General de la Operación).

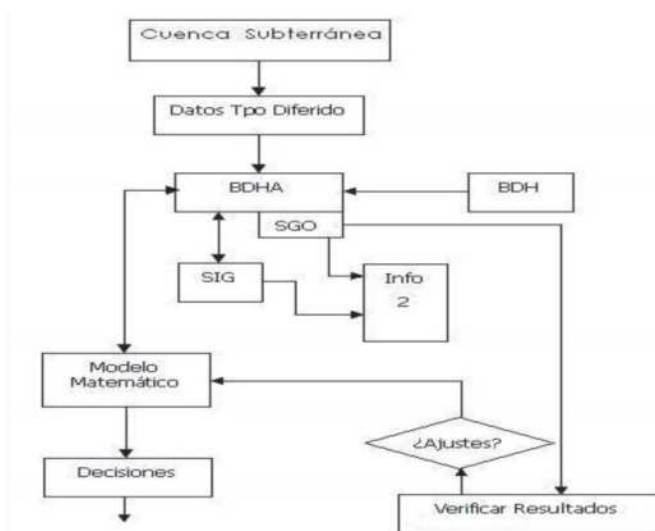


Figura 2: Procedimiento lógico de trabajo asociado con el Escalón No. 2

3- La aplicación de la PMI con todos sus componentes (SIG + MM + Sensores y actuadores con Telegestión y Sensores con Registradores de Variables + SCADA) con

toma de información en tiempo real y diferido y operación en tiempo real, empleando la mejor estrategia para cada aplicación. Constituye el último escalón en la implantación de la PMI. Se introduce el modo de captación de datos en tiempo real, a partir de la incorporación a la PMI del sistema SCADA, con lo cual se completa la integración total de las herramientas de gestión.

El procedimiento de trabajo mostrado en la Figura 3, se enuncia a continuación:

- a) Conformación del marco inicial de análisis para el establecimiento de las primeras RDO, con arreglo a la información que se dispone al momento de la puesta en marcha de la PMI, en forma de base de datos histórica y los resultados de las corridas de los modelos de simulación y optimización para el siguiente periodo de operación;
- b) Puesta en marcha y operación ininterrumpida de la automatización que permite conformar la base de datos histórica actualizada, a partir de la información de campo suministrada por el equipamiento de medición, tanto en tiempo real, como diferido. El tratamiento de esta información, así como los efectos de las acciones de control es realizado por el SCADA y el SIG, personalizado para cada aplicación;

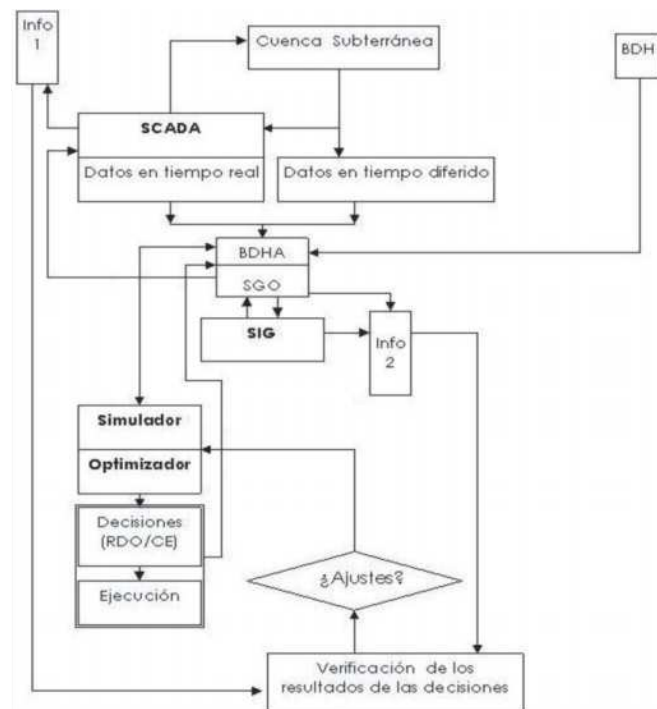
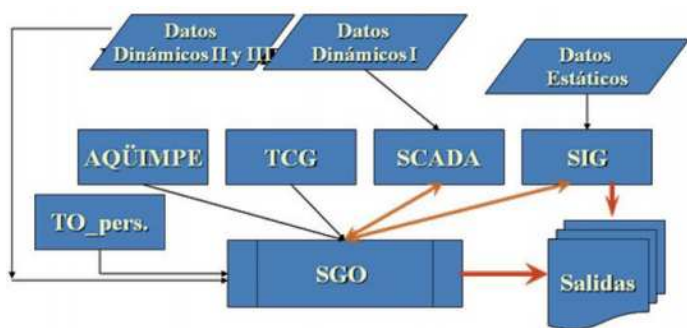


Figura 3: Procedimiento lógico de trabajo asociado con el Escalón No. 3

c) Retroalimentación y actualización de las RDO a partir de la información en línea que se genera durante todo el periodo de operación y los resultados del contraste del análisis de la información real obtenida, con los objetivos inicialmente planteados a partir de las simulaciones realizadas. Si el análisis de la información de campo recolectada arroja resultados que se alejan de los requerimientos planteados o cuestionan el comportamiento del sistema para el siguiente periodo de operación, se ejecutan los modelos de simulación y optimización con vistas a recomodar las RDO y ajustarlas a las nuevas condiciones.

La existencia de la PMI definida en Figura 4, permite desarrollar una gestión multilateral de la operación de los recursos hidráulicos de una región. Aun cuando se acometa la implantación de los primeros escalones, es posible garantizar los objetivos esenciales de satisfacción del usuario, economía y sustentabilidad.



SIG: Sistema de Información Geográfica; SCADA: Sistema de Adquisición de Datos, Supervisión y Control; RDO/CE: Reglas de Operación del Sistema basado en Criterio de Especialistas, específico para la aplicación; SGO: Supervisor General de la Operación: Planifica el trabajo de los módulos; Info. 1: Datos puntuales, tablas y gráficos de: niveles dinámicos, calidad del agua de cada pozo seleccionado, gasto, presión en la descarga, horas de trabajo y variables eléctricas de cada bomba, gasto y presión en puntos de la red, volúmenes de tanques de almacenamiento, alarmas del sistema; Info. 2: Mapas, tablas y gráficos de: niveles del acuífero actuales y pronosticados, niveles de intrusión salina actuales y pronosticados, información detallada de las variables que se midan en cada pozo seleccionado, información en la red de conducción (Q, H), datos geográficos, datos de lluvia, datos de calidad del agua.

Figura 4: Esquema de trabajo de la PMI

La satisfacción del usuario en cuanto al suministro en cantidad y calidad se garantiza mediante la generación de las RDO, de tal manera que se tengan en cuenta los aspectos que más peso relativo tienen en las decisiones. Las RDO establecen los intervalos de tiempo en los que

se activan las fuentes y el caudal de cada una de ellas. A partir del conocimiento anticipado del comportamiento del sistema que permiten los modelos, la decisión va cambiando según convenga para el mejor cumplimiento de los intereses de usuario. Los aspectos de la economía quedan también considerados en los párrafos anteriores en una forma directa, por cuanto se organiza el bombeo de forma que se reducen los consumos de energía.

La sustentabilidad del funcionamiento del sistema también se garantiza con la ejecución de las RDO, pues queda implícito la conservación y protección de la fuente. La sustentabilidad se manifiesta además, dado que la PMI permite evaluar con los modelos las consecuencias de futuras ampliaciones, cambios tecnológicos, rehabilitaciones u otras inversiones, antes que se produzcan dichos cambios y dictaminar sobre sus impactos positivos y negativos.

Otros beneficios derivados de la implantación de la PMI se asocian con la adquisición o consolidación de la experiencia práctica de los operadores del sistema en el empleo de los modelos y las herramientas de análisis en el estudio, pronóstico y retroalimentación con la información real de campo obtenida.

La implantación del tercer escalón permite adicionalmente controlar la respuesta en tiempo real del sistema (presiones, abatimientos, conductividad), y adoptar medidas para evitar la ocurrencia de fenómenos perjudiciales, algunos de los cuales pudieran llegar a ser irreversibles o su corrección necesitar importantes desembolsos monetarios.

Tecnología AQÛIMPE

El software AQÛIMPE desarrollado y aplicado en Cuba, está integrado por un conjunto de programas que realizan la simulación matemática del flujo transitorio y bidimensional en una cuenca subterránea. Sus principales características son las siguientes:

- Utiliza el método de los elementos finitos MEF como técnica numérica empleando el triángulo cuadrático como elemento de discretización, aspecto que lo hace muy eficiente y de fácil adaptación a zonas singulares o de mayor interés.
- Emplea un eficiente método de solución de los sistemas de ecuaciones algebraicas y con un algoritmo que optimiza los requerimientos de memoria, por lo que



es posible la simulación de grandes sistemas acuíferos utilizando microcomputadoras pequeñas, lo que lo hace ideal para la operación de estos sistemas en las empresas de la producción.

- Simula acuíferos freáticos y confinados, cerrados o abiertos, con descarga al mar simulando el fenómeno de la intrusión salina utilizando una interfaz abrupta.
- Permite simular la interacción entre un cuerpo de agua superficial, dígame un lago o un embalse y el acuífero que lo subyace, siempre que exista un posible intercambio entre ellos (Llanusa y Martínez, 2002).
- La versión actual de AQÜIMPE sobre Windows (WinAQE), permite simular problemas a escala local (pozos, campos de pozos, etc.), aspecto de gran importancia sobre todo en los acuíferos costeros, donde no solo es importante controlar los recursos explotables, sino también dónde y cómo éstos se explotan.
- Las salidas gráficas que ofrece son de gran utilidad para el modelador en cualquier etapa de utilización del modelo, adicionalmente la nueva versión WinAQE, permite la importación y exportación de bases de datos de la versión anterior y hacia otros softwares vinculados a los SIG.
- Se emplea el algoritmo de convergencia global *Shuffled Complex Evolution* SCE (Gómez, 2009), para la estimación de los parámetros del modelo AQÜIMPE, quedando disponible en la herramienta de software WinAQE

Desde su creación AQÜIMPE ha estado en constante desarrollo. Sin embargo, necesitaba una herramienta que permitiera a los usuarios definir de forma digital la malla de triángulos necesaria para aplicar el MEF, proceso que se realizaba de forma manual, lo cual se tornaba trabajoso, con elevadas posibilidad de cometer errores e imposibilidad de evaluar múltiples variantes, además de la imposibilidad de concebir mallas con zonas más densas de triángulos.

Para resolver este problema se ha creado AQTRIGEO (Cabrera y Escartín, 2008, 2009a y 2009b). Herramienta de un sistema de información geográfica SIG basada en una plantilla del sistema AutoCAD Map, en la cual se incluyen bloques, capas, consultas y macros en Visual Basic para aplicaciones VBA, todos estos son elementos necesarios para la organización y manejo de los datos espaciales de los objetos de la triangulación (nodos, lados y triángulos).

La esencia del proceso se basa en el establecimiento de topologías de polígonos y de puntos a partir de las entidades gráficas que sean creadas. AQTRIGEO tiene una macro que permite definir mallas más densas en la ubicación de pozos de explotación que define el usuario, con las cuales se puede tener en cuenta en la modelación regional los fenómenos locales que afectan a los abatimientos (ver Figura 5).

Todos estos atributos hacen de AQTRIGEO una excelente plataforma para la gestión de los datos espaciales, a un nivel similar a la de sus semejantes en el mundo, pudiéndose resaltar su originalidad científica, sobre todo al emplear el Método de las Componentes Principales para realizar una numeración de los nodos muy eficiente, además de su impacto científico para la tecnología AQÜIMPE ya que por primera vez se define el problema de utilizar los datos de las entidades geométricas que conforman la malla numérica para AQÜIMPE como un problema eminentemente topológico.

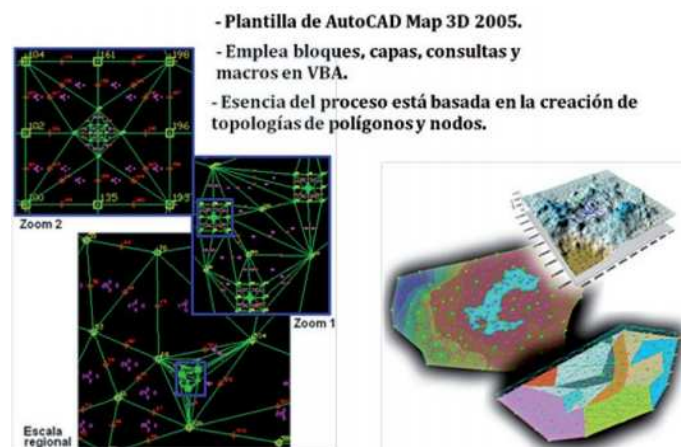


Figura 5: AQTRIGEO, herramienta SIG para el mallado y refinamiento de malla

Ejemplos del empleo de AQÜIMPE

Desde hace más de tres décadas, en Cuba se ha estado aplicando la tecnología AQUIMPE para la modelación del flujo de las aguas subterráneas con diferentes objetivos, principalmente para evaluar el comportamiento de los acuíferos como respuesta a diferentes obras de ingeniería y en la evaluación de los recursos hidráulicos subterráneos en las zonas estudiadas. No obstante lo anterior, hasta la actualidad no se ha logrado utilizar esta herramienta para

realizar políticas de asignación de la explotación global ni a corto ni mediano plazo según una primera metodología propuesta por Hernández (1992), donde se presentó un procedimiento para determinar mediante el modelo de simulación los recursos hidráulicos que garantizan el equilibrio entre la recarga anual y la explotación, de cualquier año o conjunto de años. Este procedimiento fue aplicado al modelo "CIRO" en la provincia de Ciego de Ávila y se realiza el pronóstico de la explotación a corto y mediano plazo solo empleando la tecnología de simulación AQÜIMPE.

En la década de 1980 se realizaron diversos proyectos preliminares para la protección contra inundaciones del Aeropuerto Internacional José Martí y la Textilera Ariguanabo, previéndose la construcción de canales de drenaje, rectificación de ríos y la perforación de un número elevado de pozos de recarga subterránea. El objetivo del modelo matemático del acuífero Ariguanabo con un área total de 259.7 km² fue evaluar la efectividad de tales medidas.

Otro buen ejemplo es el acuífero costero de la Cuenca Sur de La Habana, que actúa como una de las principales fuentes de abasto de la ciudad de la Habana, de las poblaciones enclavadas y de riego de diferentes cultivos, por lo que se construyó a finales de la década del 80 del siglo pasado un dique paralelo a la costa con el objetivo de interrumpir parcialmente el flujo libre hacia el mar de las aguas del humedal e incrementar así el volumen de agua almacenado en el acuífero y la carga hidráulica en la zona de almacenamiento por el efecto de remanso y como consecuencia mejorar la calidad del agua del acuífero. Se planteó la necesidad de confeccionar un modelo para evaluar el efecto del dique abarcando un área de 830 km². Se ha aplicado en la provincia de Matanzas a la cuenca M-1, en el norte de La Habana en la cuenca Jaruco-Aguacate. También se reporta en Ricardo (2004) su aplicación en la provincia de Las Tunas con el modelo "La Cana".

En otros países cabe destacar la utilización de AQÜIMPE como en México, donde primeramente se realiza la evaluación de la interacción existente entre el lago Tequesquitengo y el acuífero subyacente. Para ello Martínez y Gutiérrez (2004a) calibraron con AQÜIMPE una zona del acuífero que rodea al lago, y después de realizar la simulación, el modelo reprodujo con precisión los niveles

observados en el lago demostrándose la importante relación hidráulica que existe entre estos cuerpos de agua (Martínez y Gutiérrez, 2004b). Años después se aplica AQÜIMPE, también en México, pero en este caso en la cuenca del Lago Pátzcuaro donde se demuestra que el lago existe gracias a la presencia de un acuífero que lo subyace y rodea (Cabrera, 2007). Estos trabajos fueron realizados gracias al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.

Modelación matemática para la evaluación de recursos hidráulicos subterráneos

Desde hace más de tres décadas en Cuba se ha estado aplicando la tecnología AQÜIMPE para la modelación del flujo de las aguas subterráneas con diferentes objetivos, principalmente para evaluar el comportamiento de los acuíferos como respuesta a diferentes obras de ingeniería y en la evaluación de los recursos hidráulicos subterráneos en las zonas estudiadas. No obstante lo anterior, hasta la actualidad no se ha logrado utilizar esta herramienta para realizar políticas de asignación de la explotación global ni a corto ni mediano plazo según una primera metodología propuesta por Hernández (1992), donde se presentó un procedimiento para determinar mediante el modelo de simulación los recursos hidráulicos que garantizan el equilibrio entre la recarga anual y la explotación, de cualquier año o conjunto de años. Este procedimiento fue aplicado al modelo "CIRO" en la provincia de Ciego de Ávila y se realiza el pronóstico de la explotación a corto y mediano plazo solo empleando la tecnología de simulación AQÜIMPE.

El procedimiento anterior permite evaluar recursos regionales a partir del modelo calibrado y definir estrategias de explotación global, pero sin establecer políticas de explotación óptima, ni considerar restricciones locales, para lo cual se requiere de un modelo de administración que utilice las técnicas de optimización como MADA que se expone a continuación.

Creación del modelo de administración de acuíferos MADA

El modelo AQÜIMPE resuelve el llamado problema directo de la modelación regional del agua subterránea, es decir, calcula los niveles piezométricos en cada instante



de tiempo de la simulación en toda la zona de estudio, conocidos previamente, las propiedades hidrogeológicas (por zonas) y los flujos de entrada (fundamentalmente la recarga debido a la lluvia) y de salida (fundamentalmente las extracciones realizadas desde pozos).

Pero AQÜIMPE individualmente no es capaz de resolver los problemas que se plantean a continuación:

- Dada una demanda conocida en el tiempo para todo el acuífero y las capacidades mínima y máxima de extracción de cada pozo del acuífero. ¿Cómo se distribuye espacialmente la extracción de ese volumen de agua para garantizar que al final del período de explotación de los niveles en toda la fuente se encuentren con la menor afectación posible?

- Dadas las capacidades mínima y máxima de extracción de cada pozo del acuífero, así como todas las restricciones de niveles y caudales que garanticen vitalidad y no contaminación de la fuente, ¿Cuál es la máxima cantidad de agua a extraer de la fuente para cada intervalo de tiempo?

Estas y otras interrogantes vitales a resolver para garantizar una administración correcta de los acuíferos, deben ser afrontadas con la ayuda de modelos de simulación como AQÜIMPE, pero deben incluirse otras herramientas que conciben algoritmos de optimización. Este se conoce como uno de los problemas inversos de la modelación regional del agua subterránea.

Para resolver este problema se creó el modelo de administración de acuíferos denominado MADA, el cual se basa en la inclusión de todas las ecuaciones de AQÜIMPE, dentro de un algoritmo de programación lineal como restricciones de igualdad, conocido como sistema acoplado, y este es uno de los aspectos más originales del sistema propuesto. Por lo general esta variante de sistema acoplado no es muy empleada en el mundo, al parecer por su complejidad en la formulación e implementación, sin embargo tiene el valor de tener dentro del algoritmo de optimización al modelo de flujo (en este caso AQÜIMPE), en contraste con el método de la matriz respuesta o Funciones Tecnológicas Algebraicas FTA.

El método de las FTAs fue desarrollado por Dilla (1993), a partir del trabajo desarrollado por Maddock en 1972 y citado por Das y Datta (2001) donde incorpora las respuestas de un modelo de simulación a uno de técnicas

de optimización. La propuesta se basa en que es posible construir FTAs que representen linealmente el abatimiento en los pozos de bombeo como función del bombeo o extracción, realizada durante diferentes períodos de tiempo. En Dilla y Mesa (1994) se aplica el método de las FTAs y posteriormente su resultado se introduce en un algoritmo de programación lineal para encontrar políticas óptimas de explotación del acuífero de Ariguanabo en la provincia Habana: maximizar el bombeo en el campo de pozos durante un período húmedo prolongado con restricciones de demanda, límites de caudal de explotación y evitar excesivos descensos, maximizar el bombeo en período seco prolongado y satisfacer la demanda, garantizando la menor depresión del acuífero. Otro aporte en este sentido es publicado por Martínez (2002) donde se utiliza el método de los autovalores con el fin de aplicarlo posteriormente en la generación de FTAs.

En el modelo MADA se desarrollaron un grupo de funciones objetivo de naturaleza lineal, que garantizan diferentes propósitos en la distribución espacial de las extracciones del acuífero, así como restricciones a las variables de decisión que garantizan tener en cuenta aspectos de valor práctico como la imposibilidad de que se pueda extraer de un pozo, más que su caudal máximo asociado a la capacidad instalada. Así se definieron restricciones de demanda, de capacidad instalada y de niveles mínimos.

Otro resultado importante es la introducción en MADA de un procedimiento con el cual se generan un grupo de restricciones que brindan la posibilidad de tener en cuenta todos los efectos locales que modifican los niveles regionales en los pozos de bombeo, y por lo tanto permite que en el proceso de administración se tomen en consideración los niveles reales en los pozos de bombeo (Hernández, 2009; Cabrera y Hernández, 2011). Este procedimiento tiene las ventajas de depender solamente del gasto específico de cada pozo y de emplear una malla pequeña.

Los acuíferos costeros y su gestión

Algunos de los más diversos y productivos hábitats que engloban extensas áreas de complejos y únicos ecosistemas se encuentran en las áreas costeras; incluyen las planicies costeras, zonas litorales, mangles, arrecifes

coralinos, deltas de ríos, fondos marinos, etc., los cuales son fuentes de producción de alimentos y soporte de una variada actividad económica que incluye la pesca, el turismo, la recreación y la transportación, siendo uno de los principales peligros o amenazas ambientales la fragilidad del equilibrio dinámico que se presentan en los acuíferos costeros por las relaciones entre las aguas dulces, salobres y saladas.

Los países con regiones costeras han reconocido varios elementos que contribuyen a su mayor vulnerabilidad ambiental que incluyen: fragilidad ecológica, rápido crecimiento poblacional humano, limitados recursos de suelos, alta dependencia de los recursos marinos, contaminación por fertilizantes y plaguicidas, exposición a peligros de desastres por eventos extremos y a los cambios climáticos globales, estando muchos de estos factores de vulnerabilidad y sustentabilidad ambiental asociados a las aguas dulces y su principal fuente, los acuíferos costeros. Lo anterior es particularmente cierto en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas como sucede en las planicies costeras, donde se debe implementar políticas de prevención y remediación, como es la utilización de la recarga artificial en algunos lugares para evitar el avance de la intrusión salina o el drenaje en zonas donde los niveles freáticos altos son amenazas ambientales por la salinización de suelos. Así como facilitar el movimiento de sustancias contaminantes en las aguas subterráneas cuando se reducen los espesores de la zona no saturada y afectaciones a obras civiles y zonas arqueológicas que son patrimonio de la humanidad como sucede en la Región la Libertad en la costa del Pacífico de Perú.

Los principales problemas que originan la intrusión salina están asociados a la sobre-explotación del acuífero cuando las demandas exceden las posibilidades de entrega del sistema. En esto incide un inadecuado conocimiento de su dinámica, insuficiente control de la explotación, niveles y calidad del agua, dando lugar a una mala gestión a corto y largo plazo. Los acuíferos costeros constituyen uno de los sistemas más vulnerables a los efectos de la variabilidad climática y al cambio climático. Por ello ha sido objeto de preocupación y análisis por parte de instituciones internacionales y programas de las Naciones Unidas como el Programa Hidrológico Internacional, donde en el VII periodo del 2008-2013 señala la necesidad de atender el impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico y

su consecuente impacto en los recursos hídricos, por lo que se plantea que el manejo de los sistemas acuíferos deben responder a los cambios globales y a la variabilidad climática. Entre los programas hidrológicos de la UNESCO en acuíferos costeros, cabe destacar GRAPHIC (*Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change*).

Desde la pasada década se viene planteando, la necesidad de enfatizar en el adecuado manejo de los recursos hidráulicos subterráneos costeros en su interacción con las aguas superficiales y los suelos, para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas costeros, sobre todo para enfrentar los problemas de la sequía y otros aspectos de la variabilidad y el cambio climático (Alley *et al.*, 1999). Para lograr el anterior objetivo es necesario, tanto la implementación de nuevas tecnologías, como la utilización adecuada de sistemas de captación y control.

Por lo general la selección del tipo de obras de captación de las aguas subterráneas ha respondido a criterios técnicos, por lo que las más frecuentes utilizadas han sido los pozos verticales. Es importante destacar, que las grandes diferencias entre los niveles estáticos y dinámicos, producidos por los pozos de bombeo verticales (necesariamente de penetraciones parciales por lo que se originan mayores descensos), causa un anormal y rápido crecimiento de la superficie de contacto entre las aguas dulces y las saladas, provocando que altas concentraciones de cloruros permanezcan durante mucho tiempo en las aguas anteriormente dulces (conos de intrusión), antes de regresar a las condiciones naturales originales. La ruptura periódica producto del bombeo de las características del balance de la salinidad de las aguas subterráneas sin un control, lleva a un deterioro acelerado de su calidad hasta convertirse en un problema irreparable a corto plazo.

Aplicación de las nuevas tecnologías en el acuífero costero del sur de La Habana

El tramo HS-3 de la Cuenca Sur de La Habana se encuentra al sur de la provincia de La Habana y ocupa una superficie aproximada de 830 km². Es una cuenca cárstica de llanura con cobertura de suelos ferralíticos muy permeables donde hay un intenso desarrollo agrícola.

La hidrogeología de la zona se caracteriza por formaciones con gran heterogeneidad y anisotropía, también se trata de

una cuenca subterránea abierta al mar por su límite sur donde existe el llamado Dique Sur de La Habana que se muestra en la Figura 6 como una línea de color rojo vino a lo largo de la costa sur.



Figura 6: Foto satelital del tramo SH-3 de la Cuenca Sur de La Habana

Esta es una de las zonas más potentes del país desde el punto de vista acuífero y por tal motivo existe una fuerte explotación destinada a la agricultura y al abasto de los principales pueblos de la zona Alquizar-Güira de Melena. Especialmente importante es el caudal que se extrae del llamado campo de pozos Cuenca Sur que se utiliza para el abasto a la ciudad de La Habana y que está constituido por 19 pozos de los que se extrae un caudal de 220 l/s de cada uno, estos pozos se encuentran justo en el centro de la Figura 6, representados por puntos de color rojo.

La implementación de las nuevas tecnologías en este acuífero ha pasado por la utilización de la modelación matemática para evaluar los efectos del Dique Sur, la evaluación de los recursos explotables con las técnicas matemáticas, la introducción de los escalones 1 y 2 de la Plataforma Modular Integrada PMI, la utilización del SCADA para el control y operación de los pozos de bombeo con mando a distancia y la aplicación del modelo de administración MADA para optimizar y definir políticas de explotación atendiendo a los efectos locales en los pozos de bombeo. Se están desarrollando sensores para el control en tiempo real de los niveles en los pozos de bombeo y en pozos de observación, con el objetivo de lograr introducir el escalón 3 de la PMI.

Debido a la intensa explotación de esta zona, y a la inobjetable interacción del acuífero con el mar en la costa sur, existe una cuña de intrusión de agua salada que ha penetrado subterráneamente en tierra alrededor de unos 14 km bajo esta gran llanura a pesar de la construcción del Dique Sur.

El Dique Sur se construyó precisamente para retener el agua dulce que drenaba superficialmente por una serie de canales que desembocaban en la costa sur, y con esta barrera se crea un nivel de agua dulce que hace retroceder al agua salada. Tiene una cota de corona que varía por zonas de 1.0 m a 1.5 m por encima del nivel medio del mar NMM y los aliviaderos están de 0.7 m a 0.9 m del NMM respectivamente.

Con la fuerte explotación de los pozos de Cuenca Sur, para cumplimentar una demanda anual aproximada de 100 hm³, ha habido años de poca lluvia en que algunos pozos se han contaminado por salinización, constituyendo este un aspecto de mucha preocupación para las autoridades encargadas de la administración del preciado recurso.

Es por eso que el objetivo principal de esta primera aplicación del modelo MADA es evaluar la política de explotación de los 19 pozos de Cuenca Sur, tomando como patrón el año 2007, teniendo en cuenta la correcta preservación de los recursos globales del acuífero y una correcta distribución de las extracciones en los pozos.

Primeramente se realizó una amplia búsqueda de información y se prepararon todos los datos necesarios para realizar una simulación de AQUEMPE teniendo en cuenta el caudal real extraído de los 19 pozos de Cuenca Sur en el año 2007 que ascendió a unos 97.6 hm³, el intervalo de tiempo es el mes y se analizaron 12 meses.

Uno de los datos más importantes definidos gracias a una gran cantidad de información brindada por la Empresa Aguas de la Habana fue la relacionada con los pozos de bombeo. En este sentido se pudo definir para cada pozo, el nivel mínimo permisible de carga hidráulica h_a por encima del NMM que garantizará según la hipótesis de Ghyben-Herzberg que la posición del cono de intrusión salina se ubique en el fondo de pozo, ver Figura 7.

En Cabrera (2010) y Cabrera y Dilla (2011) se presentan los resultados de la creación de un sistema para la administración óptima de la explotación del agua

subterránea en su aplicación a uno de los acuíferos más importantes del país: el tramo HS-3 de la Cuenca Sur de la Habana, donde se evaluó la explotación de los pozos del acueducto Cuenca Sur, incluso teniendo en cuenta recientes pronósticos de los posibles escenarios de eventos extremos y de aumento del nivel medio del mar, derivados del proceso de cambio climático.

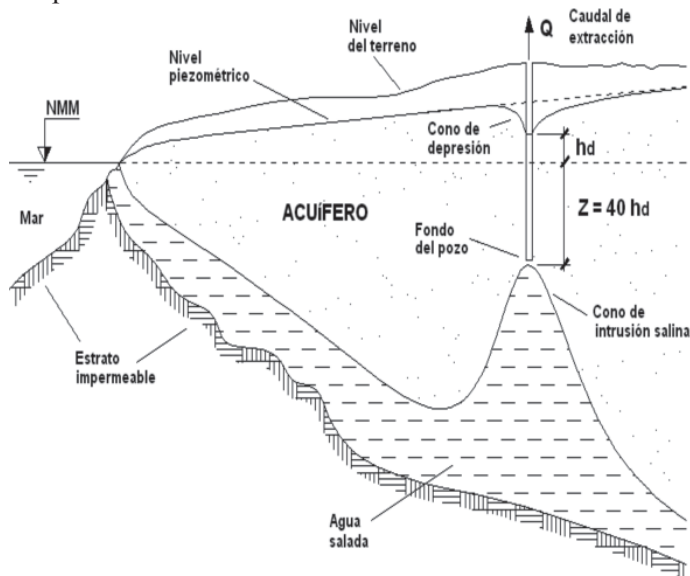


Figura 7: Perfil por el acuífero con cono de intrusión salina provocado por una intensa extracción en los pozos

Los resultados de esta primera simulación indicaron que a nivel global (de todo el acuífero) se podía extraer la cantidad de agua planificada para este año ya que el volumen de agua calculado al final del período de simulación es mayor que el de inicio. Sin embargo, en los pozos 15 y 16, los niveles reales calculados están muy por debajo de los mínimos permisibles (encontrados como se explicó anteriormente). También es interesante decir que los pozos 12 y 14 no trabajaron en los meses del 3 al 9, posiblemente por roturas y mantenimientos o por extracción de agua con un alto contenido de sal (contaminada). En realidad esto último no se pudo constatar, ya que la información de calidad del agua extraída de cada pozo no fue posible adquirirla a pesar de esfuerzos realizados en este sentido.

Este hecho implica que no solo basta con realizar un balance hidráulico global del acuífero para decidir sobre una correcta política de explotación, sino que es necesario realizar un análisis de la distribución espacial de la explotación.

Con estas ideas se ejecutó el modelo de administración MADA definiendo los niveles mínimos permisibles en cada uno de los pozos como restricciones de nivel, además se empleó la función objetivo que garantiza la máxima extracción del campo de pozos. Los resultados brindan un esquema de bombeo en el cual cada bomba está sin trabajar un mes del año para realizar reparaciones, todos los niveles en los nodos están por encima de los mínimos impuestos e incluso se puede extraer un volumen mayor que el anterior, 106 hm^3 .

Posteriormente se realizó otra aplicación que perseguía el objetivo de evaluar la respuesta del acuífero en el tramo HS-3 de la Cuenca Sur de la Habana ante los posibles escenarios de eventos extremos y de aumento del nivel medio del mar, derivados del proceso de cambio climático. En este sentido los pronósticos de variación interanual de las precipitaciones no son tan precisos, las tendencias observadas durante los últimos años apuntan hacia una intensificación de los períodos de sequía. Por otra parte se pronostican escenarios de cambio climático para Cuba, que indican un aumento del NMM entre 8.87 cm y 44.41 cm, en dependencia de la sensibilidad climática y el escenario de emisión de gases que se considere, todo esto para un período de 30 años centrado en el 2050.

El acuífero en estudio es de muy rápida respuesta ante los cambios climáticos, como se evidencia en la rapidez con que el mismo se agotó o aumentó su volumen en las corridas de AÑIMPE, realizadas para los períodos seco y húmedo respectivamente. Esto se debe a que es cárstico y tiene altos valores de transmisividad.

El nivel del remanso de las aguas subterráneas aguas arriba del dique producido por un aumento del NMM, es un factor determinante en la respuesta del acuífero ante esta variación. El nivel del remanso a su vez depende de los niveles en los aliviaderos del dique, por lo tanto es muy importante la revisión y mantenimiento de la estructura del Dique Sur desde el punto de vista de los recursos hidráulicos.

Si se considera un aumento del NMM de 44.41 cm con respecto al NMM del año 1990 para el período de 30 años centrado en el 2050, y además se supone que las cotas en los aliviaderos del Dique Sur descienden hasta 0.5 m, hipótesis demostrada en Rodríguez (2010), el agua

del mar penetra en el área de estudio hasta una distancia promedio de 2 km, provocando se inunde una franja de aproximadamente 50 km².

Para el período de 30 años centrado en el 2050, asumiendo un período climático húmedo y los posibles valores de aumento del NMM de 23.3 cm y 44.41 cm correspondientes a las sensibilidades media y alta, es posible extraer el máximo caudal de los pozos del acueducto de Cuenca Sur sin provocar en el acuífero una depresión significativa de sus niveles, ni un avance considerable en la cuña de intrusión salina.

Para el período de 30 años centrado en el 2050, asumiendo un período climático seco, como valor de aumento del NMM 44.41 cm y que se mantiene el volumen de explotación actual de los pozos para la agricultura y los que abastecen a los distintos pueblos de la provincia Habana, no es posible extraer agua de los pozos del acueducto de Cuenca Sur sin provocar la contaminación de los mismos. Esto implica que para este escenario es necesario replantearse los volúmenes de extracción totales del acuífero, y no solamente los correspondientes a los pozos del acueducto de Cuenca Sur (Rodríguez, 2010).

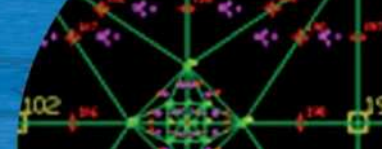
Conclusiones

El trabajo muestra que los acuíferos como fuentes de abasto constituyen sistemas muy complejos que requieren del empleo de tecnologías que permitan: i) caracterizarlos mediante modelos conceptuales que integren todas las bases de datos disponibles que permitan conocer su funcionamiento hidrodinámico y respuestas ante diferentes políticas de gestión, ii) la modelación matemática es la única herramienta tecnológica capaz de evaluar el comportamiento de los acuíferos, iii) la confiabilidad de los resultados depende de la calidad de las bases de datos, por lo que se impone mejorar los sistemas de adquisición, almacenamiento y manejo de dichas bases, iv) las políticas de operación deben realizarse bajo diferentes horizontes de planeamiento y no solo para un año, atendiendo a que los sistemas acuíferos por lo general tienen comportamiento hiperanual y, v) las técnicas de optimización deben emplearse para garantizar la mejor explotación del sistema, satisfaciendo las demandas y restricciones necesarias.

La Plataforma Modular Integrada PMI constituye una

herramienta capaz de integrar todos los aspectos anteriores, caracterizada por cuatro elementos fundamentales (Gómez, 2009):

1. Integra las tres herramientas que, de manera independiente, se reportan en la literatura para la gestión de los recursos hidráulicos: (I) la Modelación Matemática MM que permite la simulación y optimización de los procesos a estudiar; (II) el SIG como tecnología informática de la geografía, y que vinculada con la MM, conforman una importante herramienta para el estudio espacial y la gestión de la operación; (III) la implementación de un sistema de adquisición y procesamiento de datos en tiempo real, personalizado para cada aplicación, que tiene en cuenta los procesos de operación y que se encuentra estrechamente vinculado con los resultados que proporcionan los otros dos componentes. Esta integración está basada en datos y un módulo de supervisión general de la operación, que garantiza que el procesamiento de la información relevante aportada por cada componente, sea coherente y efectivo.
2. La información de las variables que describen el proceso, es recibida por diferentes vías y se almacena en una Base de Datos Histórica Actualizada BDHA con diferentes frecuencias en la adquisición del dato y única para todos los componentes de la PMI, lo que posibilita el uso racional de los soportes de almacenamiento, un mejor y más eficiente trabajo de los programas que emplean la BDHA, y una economía importante en la inversión del capital destinado a adquisición y procesamiento de la información que se recolecta. La frecuencia de adquisición de cada variable que integra la BDHA se define en función de la característica temporal de la variable y de la respuesta que el usuario espera del sistema.
3. Está estructurada sobre una estrategia de desarrollo por escalones. Los escalones representan etapas sucesivas que van desde la aplicación de elementos sencillos hasta la introducción de elementos con alto grado de desarrollo tecnológico. De esta manera, cada grupo de resultados (escalón) que se culmina, sirve de sólido apoyo para el siguiente. Por tanto, el proceso inversionista de la solución final estará dividido en etapas y para comenzar el mismo, no es necesario contar con todo el presupuesto necesario para llevar la solución hasta la última. Cada



escalón es un prerequisite indispensable del siguiente y un apoyo total, lo cual garantiza que la inversión precedente sea totalmente válida para la siguiente etapa.

4. Con la implementación del primer escalón y hasta la puesta en funcionamiento del último, va en paralelo un proceso de formación de capacidades a todos los niveles que permite a la entidad usuaria adiestrar a su personal para, de esta forma, obtener de la PMI las mayores ventajas en su empleo.

Referencias

Alley, M., Reilly, E. and Lehn, O. (1999). Sustainability of Ground-Water Resources. *U.S. Geological Survey. Circular* 1186. Denver, Colorado.

Cabrera, E. (2007). Simulación de acuíferos con el empleo de herramientas de los Sistemas de Información Geográfica. Tesis de Master en Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH. La Habana, Cuba.

Cabrera, E. (2010). Sistema para la administración de la explotación del agua subterránea. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH. La Habana, Cuba.

Cabrera, E., y Escartín, E. (2008). AQTRIGEO, una herramienta SIG para el modelo de flujo en medio poroso (AQÜIMPE). *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena de Indias, Colombia.

Cabrera, E. y Escartín, E. (2009a). AQTRIGEO Un programa para automatizar el manejo de datos espaciales del modelo bidimensional de flujo de agua subterránea (AQÜIMPE). Manual de usuarios. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH, Cuba.

Cabrera, E. y Escartín, E. (2009b). Propuesta para automatizar el manejo de datos espaciales del modelo bidimensional de flujo de agua subterránea (AQÜIMPE). *VI Congreso Internacional de Geomática*, La Habana, Cuba.

Cabrera, E. y Dilla, F. (2011). Modelo de administración de acuíferos: MADA. *Tecnología y Ciencias del Agua* **2**(4), 1-11.

Cabrera, E. y Hernández, A. (2011). Modelación del agua subterránea a escala regional con refinamiento local de la malla. Planteamiento y validación del algoritmo. *Tecnología y Ciencias del Agua* **2**(1), 65-82.

Das, A. and Datta, B. (2001). Application of optimization

techniques in groundwater quantity and quality management. *Sadhana* **26**(4), 293-316.

Dilla, F. y Mesa, H. (1994). Modelos de administración óptima del acuífero Ariguanabo. *Boletín Geológico y Minero* **105**(5), 461-467.

Dilla, F. (1993). Modelación matemática del flujo subterráneo y las técnicas de optimización aplicadas en la investigación y explotación de acuíferos a escala regional. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH, La Habana, Cuba.

Gómez, M. (2009). Plataforma Modular Integrada para la gestión del agua subterránea como recurso. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH. La Habana, Cuba.

Hernández, A. (1992). La explotación de acuíferos a escala regional y la modelación matemática como su base tecnológica. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH. La Habana, Cuba.

Llanusa, H. y Martínez, J.B. (2002). Modelación explícita de embalse y acuífero. *Ingeniería Hidráulica en México*, **17**(4), 89-97

Hernández, A.O. (2009). La modelación matemática y la explotación de los acuíferos costeros. *IX Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica*, Cuba.

Martínez, J.B. y Gutiérrez, C. (2004a). ¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el lago de Tequesquitengo1. Calibración de un modelo del sistema hidrológico. *Ingeniería Hidráulica en México* **19**(4), 33-46.

Martínez, J.B. y Gutiérrez, C. (2004b). ¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el lago de Tequesquitengo2. Simulación de eventos en el siglo XIX. *Ingeniería Hidráulica en México* **19**(4), 47-56.

Martínez, J.B. (2002). El método de los autovalores en el flujo del agua subterránea. *Ingeniería Hidráulica en México* **17**(3), 37-51.

Ricardo, R. (2004). Modelación del Acuífero La Cana y evaluación de sus Recursos Hidráulicos Subterráneos. Tesis de Master en Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH. La Habana, Cuba.

Rodríguez, L. (2010). Posibles impactos del cambio climático en el tramo HS-3 de la Cuenca Sur de La Habana. Tesis de Pregrado en Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH. La Habana, Cuba.

Requerimientos de publicación

1. Los artículos enviados deben ser originales y no haber sido publicados antes ni estar en proceso de revisión por otra publicación. Una vez que el artículo es recibido conforme a los puntos detallados más abajo, éste será enviado a revisores externos, expertos en los temas específicos que trata el artículo. Los autores tienen la responsabilidad de reconocer y declarar cualquier conflicto de intereses que pudiera sesgar su trabajo, por ejemplo, indicando fuentes de financiamiento y apoyo.
2. El artículo deberá tener una extensión máxima de 8000 palabras. No se exige un formato específico, pero se sugiere usar tamaño de letra 12, tipo de letra Verdana y espaciado doble. Se pide claridad tanto en lo escrito, o sea, buena redacción con una secuencia lógica de lo que se presenta, como en las figuras, gráficos, tablas y fotos.
3. Los artículos deberán tener en su primera página el título, el nombre y apellido del o los autores, además de la afiliación, dirección postal y electrónica de todos los autores. El título debe estar en castellano y en inglés.
4. El resumen o abstract no debe exceder las 250 palabras y debe apuntar a los aspectos claves del artículo y dar una síntesis de las aplicaciones y conclusiones más importantes que el artículo entrega. El abstract debe ser una traducción correcta del resumen al inglés. Se deben incluir palabras claves tanto en castellano como en inglés.
5. Las referencias deben estar completas y correctas. Las referencias citadas en el texto, figuras y tablas deben estar incluidas en las referencias al final del artículo y viceversa. En el texto, figuras y tablas, las referencias deben citarse como Martínez (2008) o (Goodell y Warren, 2006). Para más de dos autores deben indicarse como (Van Abeelen et al., 2008). Al autor de un mismo año deben diferenciarse usando 2010a, 2010b, etc. El estilo de las referencias debe seguir los esquemas siguientes:

6. Navarrete, M. (2009). Influencia del contenido de finos no plástico en la rigidez y el amortiguamiento a bajas amplitudes de deformación en arenas cuarzosas. *Obras y Proyectos* 6, 19-30
Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, Th. and Poblete, M. (2005). Correlation of cyclic preloading with the liquefaction resistance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25 (12), 923 - 932
Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Spon Press
7. Las tablas y fórmulas (ecuaciones) deberán ser numeradas secuencialmente en el mismo orden en que aparecen en el texto, con números arábigos y haciendo referencia a ellas como: Tabla 1, Tabla 2, fórmula (1), fórmula (2)...etc., según corresponda. En el caso de las tablas, ellas no deben duplicar los resultados presentados en gráficos y el título debe colocarse en la parte superior. El sistema de unidades a emplear será el Sistema Internacional (SI).
8. Las figuras pueden incluir gráficos, esquemas y diagramas. Las figuras deben enviarse en una condición lista para su publicación, con calidad de impresión láser. Si son fotografías, deben ser de alta calidad. Deben numerarse en forma secuencial: Figura 1, Figura 2 o Foto 1, Foto 2, etc. y su título deberá colocarse en la parte inferior. Las figuras deberán ser mencionadas dentro del texto antes de que aparezcan.
9. Las opiniones vertidas en los artículos publicados en *Obras y Proyectos* son de exclusiva responsabilidad del autor o los autores de los mismos y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.
10. El envío de un artículo a la revista *Obras y Proyectos* implica que los autores aceptan transferir el derecho de autor de sus artículos a la Editorial siempre y cuando el artículo sea aceptado para publicación. El derecho de autor cubre los derechos exclusivos para la reproducción y distribución del artículo, incluyendo re-impresiones, reproducciones fotográficas, microfilms, escaneo de documentos o cualquier reproducción de naturaleza similar así como traducciones. Permisos para usar figuras que no son de propiedad de los autores deben ser obtenidos por el autor en forma previa al envío del artículo.



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Laboratorio de GeoMateriales

La asesoría que necesita para sus proyectos



Laboratorio de GeoMateriales UCSC



El Laboratorio de GeoMateriales es parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción

Ensayos de laboratorio y en terreno

Mecánica de suelo

- Exploración
- Clasificación y propiedades índices
- Resistencia al corte, triaxial, corte directo, veleta
- Permeabilidad, compactación, consolidación

Proyectos geotécnicos

Tecnología del hormigón

- Control de calidad
- Extracción de testigos

Inspección técnica

Investigación

Alonso de Ribera 2850 Campus San Andrés Concepción

Fonos: 56 41 2345566 - 56 41 2345047 - 56 41 2345303 - Fax: 56 41 2345300 lgm@ucsc.cl

Academic position in Engineering Geology



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION



We are looking for academics to fortify our recently implemented Engineering Geology program in the Department of Civil Engineering (www.civil.ucsc.cl) of the Catholic University of Concepción (www.ucsc.cl). We are interested in candidates with a knowledge of Rock Mechanics (underground excavations, slope stability, laboratory testing), Hydrogeology, Geophysics (in situ testing), Seismology, Structural Geology and Natural Hazards. Candidates can be Geologists, Geophysicists, Civil Engineers, Engineering Geologists or other related professional with a doctorate in a relevant topic. As an academic you will lecture undergraduate and graduate students, develop a line of research as well as carry out laboratory and field work.

Further questions please contact Dr. King (rking@ucsc.cl) or Dr. Villalobos (avillalobos@ucsc.cl).

Facultad de Ingeniería – Departamento de Ingeniería Civil – Alonso de Ribera 2850 – Concepción – Chile – 56 41 2345307/ 56 41 2345566

GEOPIER CIMENTACION INTERMEDIA® PILAS DE GRAVA COMPACTADA



- ELEMENTOS RÍGIDOS DE ALTA RESISTENCIA
- CONTROL DE ASENTAMIENTOS

- CAPACIDAD DE CARGA SUPERIOR
- AHORRO EN COSTOS DE CIMENTACIÓN

Trabajando a lo largo de todo Chile



- Fundaciones Especiales
- Canalizaciones Subterráneas

Fundaciones Especiales

- Anclajes Postensados (Temporales y Permanentes)
- Muro Berlínés
- Muros Pantalla
- Pantallas Plásticas
- Water In Take
- Soil Nailing
- Estabilización de Taludes
- Pilotes Hincados
- Pilotes Preexcavados
- Inyecciones de lechadas y compuestos químicos.
- Drenajes Sub-Horizontales
- Micropilotes
- Densificación de Terrenos
- Compactación Dinámica
- Ingeniería Geotécnica
- Pruebas de Carga

Canalizaciones Subterráneas

- Hincado Subterráneo desde Diam=150 mm. hasta Diam=1.200 mm.
- Cracking de Agua, Gas y alcantarillado (renovación de redes sin rotura de pavimentos)
- Atravesos Subterráneos de Tuberías Plásticas
- Relining
- Atravesos en roca

DYWIDAG-SYSTEMS
INTERNATIONAL

DSI CHILE



**DSI - Proveedor de Soluciones para la
Industria de Construcción**

- Barra Roscada DYWIDAG (85/105 Kgf/mm²)
- Barra Roscada GEWI® (50/55 Kgf/mm²)
- Sistema de Anclajes Permanentes de Barras y Torones, tipo SCP-DCP
- DYWI® DRILL, Sistema de Barra Autoperforante
- Micropilotes
- Sistema de Postensado de Estructuras de Hormigón



Oficina - Planta
Las Encinas #1387, Valle Grande
Lampa ~ Santiago ~ Chile
Tel: +56 2 5969637
Fax: +56 2 5969669

construcciones@dywidag-systems.cl
www.dywidag-systems.com