Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura

United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization

Programa Hidrológico Internacional
International Hydrological Programme

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873 2

VOL. 5
SEP. 2013

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

Publicado en el 2013 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Published in 2013 by the International Hydrological Programme (IHP) of the Regional Bureau for Science for Latin America and the Caribbean of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso, 11200 Montevideo, Uruguay.

ISSN 1688-2873

© UNESCO 2013

Foto de portada: © Gabriel Soumis-Dugas, UNESCO.

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.

The designations employed and presentation or materials throughout the publications do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities or concerning the delimitations of its frontiers or boundaries.

Programa Hidrológico Internacional
para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)
Oficina Regional de Ciencia para América
Latina y el Caribe
UNESCO
Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: + 598 2 413 20 75
Fax: + 598 2 413 20 94
E-mail: aqualac@unesco.org.uy
http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac

CONSEJO EDITORIAL

Eric Alfaro - Clima
Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Patricia Avila - Ciencias Sociales / Antropología Social
Universidad Nacional Autónoma de México, México

Walter Baethgen - Agua y Agricultura
International Research Institute
for Climate and Society, USA

Gino Cassasa - Glaciología
Centro de Estudios Cientíicos, Chile

Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos
Universidade de Brasilia, Brasil

José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Evens Emmanuel - Calidad de Aguas
University of Quisqueya, Haiti

Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación
National Center for Atmospheric Research, USA

Alfonso Gutierrez - Hidrología de Supericie
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Blanca Jiménez - Aguas Urbanas
Universidad Nacional Autónoma de México, México

Lilián Laborde - Legislación
Universidad de Buenos Aires, Argentina

Michael McClain - Ecohidrología
UNESCO - IHE Water Institute, Holanda

Miguel Mariño - Aguas Subterráneas
University of California Davis, USA

Polioptro Martínez - Ingeniería Hidráulica
Universidad de Puebla, México

Victor Pochat - Gestión Integrada
Instituto Argentino de Recursos Hídricos, Argentina

Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS
Programa de las Naciones Unidas
para el Medio Ambiente

STAFF EDITORIAL /EDITORIAL STAFF

Editor en Jefe / Editor in Chief
Roberto Pizarro

Editora Ejecutiva / Executive Editor
Zelmira May
UNESCO

Coordinador de Edición / Editorial Coordinator
Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO

Diseño Gráfico / Graphic Design
Ser Graficos

Diseño de Portada / Cover Design
Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

La ecuación de Elder como puente entre el transporte de masa, la hidráulica y la geomorfología de cauces naturales en los estudios de calidad de aguas

Alfredo José Constaín Aragón y Jorge Luis Corredor Rivera

The Elder´s equation as a bridge between mass transport, hydraulics and geomorphology of natural streams in quality water studies 1

Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de Páramo Andino debidos al uso de datos mensuales, diarios y horarios

Mario Córdova M., Galo Carrillo R., Rolando Célleri

Errors in the estimation of reference evapotranspiration of an Andean Páramo region due to the use of monthly, daily and hourly data 14

Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia

Marisa Escobar, Nilo Lima, David Purkey, David Yates y Laura Forni

Hydrologic modeling and scenarios of climate change on water supply catchments of the cities La Paz and El Alto, Bolivia 23

Characterization of hardness in the groundwater of Port-au-Prince. An overview on the health significance of Magnesium in the drinking water

Evens Emmanuel, Yanick Simon, Osnick Joseph

Caracterización de la dureza en el agua subterránea de Puerto Principe. Una visión general sobre la importancia para la salud del magnesio en el agua potable 35

Effectiveness of a new method (software) to evaluate the impacts of the Madden-Julian Oscillation on rainfall in Central and South America

Jason Giovannettone, Franklin Paredes, Roberto Seiler, Andres Ravelo

Eficacia de un nuevo método (software) para evaluar los impactos de la Oscilación de Madden-Julian de las precipitaciones en América Central y del Sur 44

Efecto de la estimación de la presión atmosférica sobre el cálculo de niveles de agua y caudales

Mario Guallpa y Rolando Célleri

Effect of atmospheric pressure estimation on stage and discharge calculations 56

Gestión de la información hídrica en zona árida: caso de la Región de Tarapacá, norte de Chile.

Elisabeth Lictevout, Constanza Maass, Damián Córdoba, Venecia Herrera, Reynaldo Payano, Jazna Rodriguez y Jose Aguilera

Water resources information management in arid area: case of the Region of Tarapacá, north of Chile 69

Aspectos Socioeconómicos y ambientales de las Sequías en México

David Ortega-Gaucin e Israel Velasco

Socioeconomic and environmental Aspects of Drought in Mexico 78

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA
Universidad de Cataluña-UPC, Barcelona, España
Technical University of Catalonia-UPC, Barcelona, Spain

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO
Agua Global para la Sostenibilidad (GLOWS),
Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID)
Global Water for Sustainability (GLOWS)
United States Agency for Internacional Development (USAID)

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA
Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México
Center of Research and Higher in Studies of Social Antropology (CIESAS), Mexico

EDUARDO PLANOS
Instituto de Meteorología, Cuba
Meteorological Institute, Cuba

ALFONSO GUTIÉRREZ
Iniciativa Internacional sobre Inundaciones (IFI)
Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ)
Universidad Autónoma de Querétaro, México
International Flood Initiative (IFI)
Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ - Water Research Center)
University of Queretaro, México

JUAN CARLOS BERTONI
Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
Nacional University of Córdoba, Argentina

EVENS EMMANUEL
Université Quisqueya, Haití
University of Quisqueya, Haití

WILL LOGAN
Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWarm), USA
International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWarm), USA

SUSCRIPCIONES

Si desea recibir la revista Aqua – LAC en forma periódica en formato digital descargue el formulario de suscripción de nuestro sitio web:

www.unesco.org.uy/phi/aqualac
y envíelo a
aqualac@unesco.org.uy

SUSCRIPTIONS

If you would like to periodically receive Aqua – LAC journal in digital format download the suscription form from our website:

www.unesco.org.uy/phi/aqualac
and send it to
aqualac@unesco.org.uy

EDITORIAL

Es un placer poder editorializar por primera vez como editor en jefe, este número de la revista Aqua lac, la cual incorpora interesantes artículos que van desde las ciencias ambientales, hasta la ingeniería hidrológica e hidráulica y sus múltiples aplicaciones.

En este contexto y antes de hacer un breve comentario sobre los contenidos de esta revista del agua para América Latina y el Caribe, es preciso recordar que la misma surge como una necesidad y una demanda de los investigadores de la Región en orden a que era muy relevante contar con un canal de difusión de los resultados de las investigaciones científicas realizadas. Esto, que se planteó como una gran aspiración a inicios del siglo XXI, se concretó a fines de la primera década y desde entonces ha tenido un paso fuerte de progreso, que la ha llevado a situarse como una publicación con indexación Latin Index. Este logro fue obra del empeño y dedicación de los funcionarios de la Oficina Regional de Unesco para América Latina y el Caribe, en particular del Programa Hidrológico Internacional, y evidentemente de todos aquellos investigadores que aportaron los resultados de sus investigaciones. Asimismo, quizás muchos de nosotros quisiéramos verla como una revista con indexación ISI, la más alta en la revistas científicas, pero eso demanda un esfuerzo de proporciones que es necesario acometer con el apoyo de los investigadores e investigadoras de la Región y para ello es necesario aportar generosamente más investigaciones. Si pudiéramos elevar nuestra producción científica en torno a la revista Aqua-LAC, nos estaríamos transformando en un vehículo de altísimo valor para la difusión del conocimiento no sólo para nuestros investigadores, sino también para aquellos que desde otras latitudes nos conocen y ayudan a la investigación científica y tecnológica de nuestros países y por tanto generaríamos una invitación más amplia para nuestros jóvenes investigadores y también para aquellos que ya han establecido caminos científicos de trabajo en sus respectivas disciplinas. Como corolario a este esfuerzo, podríamos conseguir la indexación ISI, lo que sería un logro que relevaría de mejor forma a nuestra comunidad científica del agua.

Por otra parte, el presente número de Aqua-LAC aborda las sequías en México, pero lo hace desde la perspectiva de los aspectos socioeconómicos y ambientales, además de abordar la vulnerabilidad de los ecosistemas y principalmente de las poblaciones humanas rurales, hecho de alta importancia en la gestión de los territorios y su dependencia con la oferta de agua. Asimismo, otro trabajo desarrollado en el norte de Chile, aborda la necesidad de afrontar las deficiencias de información en las zonas áridas y semiáridas, las que históricamente presentan deficiencias de información básica. El documento concluye que un análisis integral de todos los datos generados en la zona en estudio, permite reducir la incertidumbre de los estudios y modelos, hecho que se constituye en la base de la sustentabilidad económica y ambiental del territorio analizado.

Un tercer estudio aborda en Ecuador el efecto de la estimación de los datos de presión atmosférica sobre

EDITORIAL

It is my pleasure to editorialize this issue of Aqua LAC for the first time as editor in chief, which incorporates interesting articles ranging from environmental science, hydrology and hydraulics engineering and their many applications.

In this context, before making a brief comment on the contents of this particular issue for this water journal for Latin America and the Caribbean, we must remember that it arises as a need and a demand of the researchers of the Region to have a dissemination channel for the results of scientific researches. This, that was put forward as a great aspiration at early twenty-first century, was completed at the end of the first decade and since then has had a strong step of progress, which has led to positioning it as an indexed publication in Latin Index.

This achievement was possible thanks to the commitment and dedication of the staff of the UNESCO Regional Office for Latin America and the Caribbean, particularly of the International Hydrological Programme, and indeed to all the researchers who contributed the results of their researches. Besides, many of us would like to see the journal being indexed in ISI, the highest indexation in scientific journals, but that demands an effort of such scale that it would need to be undertaken with the support of regional researchers and this would thus require the generous contribution of more researches. If we are able to increase our scientific production for the Aqua LAC Journal, we will be transforming it into a vehicle of great value for knowledge dissemination not only for our researchers, but also for those from other latitudes who know us and support scientific research and technology of our countries and therefore would generate a broader invitation for our young researchers and also for those who have already established scientific working paths in their respective disciplines. As a corollary to this effort, we could get the ISI indexing, which would be a way of achieving a greater relevance of our scientific community water.

This issue of Aqua LAC addresses droughts in Mexico, but does so from a socio-economic and environmental perspective, in addition to addressing the vulnerability of ecosystems, mainly of rural populations, a matter of great importance in relation to territories management and their dependence on water supply. Also, another work developed in northern Chile, addresses the need to tackle information gaps in arid and semi-arid zones, which historically present basic information deficiencies. The paper concludes that a comprehensive analysis of all data generated in the studied area, can reduce the uncertainty of studies and models, a fact that constitutes the basis of economic and environmental sustainability of the area.

A third study in Ecuador deals with the effect of atmospheric pressure data estimation on small

el cálculo del nivel de agua en pequeños cau ces y cómo estos errores se propagan hacia la estimación de caudales. Sin embargo, consiguen concluir que la pérdida de datos de presión puede ser estimada con bastante precisión para los fines de cálculo de caudales, a partir de observaciones de otro sensor y en base a métodos de regresión, aunque idealmente los datos originales deberían ser cuidados y mantenidos con mayor esmero. De igual forma, este número presenta un interesante artículo acerca de la eficacia de un nuevo método, ICI-RAFT, desarrollado por el Centro Internacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (ICIWaRM) de los Estados Unidos, para estimar la frecuencia/intensidad de un evento de lluvia de una duración determinada y a través del Análisis Regional de Frecuencias mediante el método de L-Momentos. Se encontró que la precipitación total para las estaciones seleccionadas se correlacionó mejor con la Oscilación de Madden-Julian (MJO) en cada región analizada, y que la MJO podría utilizarse como predictor de lluvia con tres a cuatro meses de antelación.

Otra investigación que presenta este número de Aqua-LAC, da cuenta de la dureza del agua subterránea en Puerto Príncipe, Haití, y la incidencia en la salud humana que genera la presencia del magnesio en el agua potable. El objetivo del estudio fue revisar la química y la toxicología del Ca^{2+} y Mg^{2} con el fin de caracterizar la dureza del agua, y ello en el contexto de que las aguas de la capital de Haití son reconocidamente duras, hecho que se ve ratificado por los resultados del estudio, aunque esto debería ser verificado por muestras de mayor tamaño, tomadas en las estaciones lluviosa y seca.

Desde Bolivia se presenta la investigación que aplica el modelo hidrológico Water Evaluation and Planning System, (WEAP), frente a escenarios de cambio climático, en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, las cuales están ubicadas en la región Occidental de Bolivia. Estas ciudades son abastecidas de agua por pequeñas cuencas glaciares de la Cordillera Real y existen bastantes limitaciones respecto a la disponibilidad y calidad de los datos hidro-climáticos. Así, los resultados para un horizonte de tiempo 2010-2050, muestran que los glaciares podrían desaparecer en los próximos 30 años y esto podría incidir drásticamente en la oferta de agua de las cuencas en estudio. Asimismo, en Cuenca, Ecuador, se desarrolló un estudio sobre los errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia en una zona de páramo andino. El objetivo fue evaluar el error cometido en la estimación de la ETo mediante la ecuación de Penman-Monteith y ello por usar datos meteorológicos en periodos horarios, diarios y mensuales. Se concluyó que se verificó una alta variabilidad de los datos, lo que causa que un valor promedio no refleje las condiciones reales del ambiente y por tanto para el ecosistema en estudio, la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith es cuestionada.

El último estudio que presenta esta edición de nuestra revista, desarrollado en Bogotá, Colombia, aborda el uso de la ecuación de Elder como puente entre el transporte de masa, la hidráulica y la geomorfología de cauces naturales en los estudios de calidad de

rivers water level calculation of and how these errors propagate to flows estimations. However, they conclude that the loss of pressure data can be fairly accurately estimated for the purposes of flow rates calculation through observations from other sensor and based on regression methods, although ideally the original data should be kept and maintained with utmost care. Similarly, this issue presents an interesting article about the effectiveness of a new method, ICI-RAFT , developed by the International Centre for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM) of the United States , to estimate the frequency/intensity of a rainfall event of a certain period and through the Regional Frequency Analysis by the L -Moments method. It was found that total precipitation for the selected stations better correlated with Madden-Julian Oscillation (MJO) in each region analyzed and that the MJO could be used as a rain predictor with three to four months in advance.

Another research presented in this Aqua-LAC issue, points out the hardness of groundwater in Port au Prince, Haiti, and the impact on human health generated by the presence of magnesium in drinking water. The objective of the study was to review the chemistry and toxicology of Ca^{2} and Mg^{2} in order to characterize the hardness of water, and this one in the context that Haitian capital waters are known to be hard, a fact which is confirmed by the results of the study, although this should be verified by larger samples, taken in the rainy and dry seasons.

A research from Bolivia is presented on the hydrological model Water Evaluation and Planning System (WEAP) application in climate change scenarios, in water supply basins of La Paz and El Alto cities, which are located in the west Bolivia region. These cities are supplied by water from small glacier basins of the Cordillera Real and there are many limitations on hydro-climatic data availability and quality. Thus, the results for a time horizon from 2010-2050 show that the glaciers could disappear in the next 30 years and this could dramatically affect water supply in basins under study. Also in Cuenca, Ecuador, a study was developed on errors in the estimation of reference evapotranspiration in an area of the Andean plateau. The objective was to evaluate the error in ETo estimating through Penman-Monteith equation for using weather data on hourly, daily and monthly periods. It was concluded that high data variability was verified, which causes that an average value does not reflect the actual conditions of the environment and therefore of the ecosystem under study, the application of the Penman-Monteith equation is questioned.

The last study of this issue of our journal, developed in Bogota, Colombia, discusses the use of the Elder equation as a bridge between mass transport, hydraulics and geomorphology of natural waterways in studies of water quality,

aguas, lo que permitiría un avance interesante en la obtención de información base y consistente, que permita optimizar el desarrollo de modelos ligados a estas dimensiones hídricas.

Finalmente, los artículos que se presentan en la versión de nuestra revista y que estamos editorializando, son una muestra de las capacidades que están inmersas en nuestras sociedades científicas, en nuestras universidades, en nuestras instituciones y en nuestra región. Por tanto, ¿cuánto más será posible disponer si concitamos y solicitamos el apoyo a nuestros colegas de los países integrantes de la red LAC y de aquellos países que nos ayudan a llevar a cabo investigaciones en nuestros territorios? Evidentemente que mucho más de lo que hemos estado difundiendo como revista científica, pero para que esas investigaciones se diseminen de una manera sencilla y masiva, necesitamos contar con el esfuerzo de todos nuestros investigadores. Si a partir de ello logramos concienciar a los tomadores de decisión, entonces podríamos contar con mayores recursos para investigar y dar respuestas a las miles de interrogantes hídricas que existen en nuestros países y entonces las actuaciones técnicas poseerán una mayor probabilidad de éxito en términos espaciales y temporales. A eso los invitamos colegas de la región; hagamos de Aqua-LAC un vehículo que entregue respuestas concretas, como fruto de un trabajo riguroso, serio, constante y enlazado con las necesidades sentidas de las personas que habitan nuestra región de América Latina y el Caribe.

Pizarro Roberto Tapia
Editor in Chief, Aqua-LAC
Professor
Director Technology Center of Environmental hydrology
University of Talca
Chile

which would allow an interesting advance in obtaining base and consistent information, so as to optimize the development of models linked to water dimensions.

Finally, the articles presented in this version of our journal that we are editorializing, are an example of the capabilities in our scientific societies, in our universities, in our institutions and in our region. Therefore, ¿how much more will be available if we request and appeal for the support of our colleagues in the countries of the LAC network and for those countries which help us to carry out researches in our territories? Obviously, much more than what we have been disseminating as a scientific journal, but we need the efforts of all our researchers for such researches to be disseminated in a simple and massive way. If from this starting point we can raise awareness among decision-makers, then we would have more resources to research and to respond to the thousands of water questions existing in our countries and then technical interventions will have a greater chance of success in terms of space and time. This is the invitation we extend to you, colleagues of our region; let´s make Aqua-LAC a vehicle to deliver specific answers, being the result of a rigorous, serious, and constant effort linked to the required needs of the people living in our Latin America and the Caribbean region.

Roberto Pizarro Tapia
Editor en Jefe, Aqua-LAC
Profesor Titular
sDirector Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental
Universidad de Talca
Chile

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación

La Revista Aqua-LAC será publicada cada seis meses o dos veces al año.

Contenido

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinaria que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social. El contenido de la publicación buscará abarcar las necesidades de la comunidad científica, gestores de los recursos hídricos, tomadores de decisiones y el público en general.

Idioma

La publicación Aqua-LAC aceptará manuscritos en inglés y español, y publicará el resumen en el idioma original del texto y un resumen en el otro idioma oficial de la revista.

Aceptación de los manuscritos

Los manuscritos sometidos para publicación deberán ser originales, no habiéndose sometido con anterioridad para su publicación en otros medios, y serán sometidos a un proceso de revisión y dictamen previos a su aceptación. Artículos invitados, o artículos en ediciones temáticas especiales, no necesariamente serán sometidos a revisión.

El Editor en Jefe, en consulta con el Consejo Directivo, se reserva el derecho de rechazar un manuscrito si se considera que su contenido en fondo y/o forma no se ajusta a la línea editorial de la revista Aqua-LAC.

Proceso de revisión

Todos los manuscritos sometidos a publicación serán revisados por al menos dos revisores calificados, no necesariamente miembros del Comité Editorial. Un manuscrito puede ser aceptado, aceptado con condiciones, o rechazado con la debida justificación en todos los casos. En el caso de que haya comentarios, el manuscrito será devuelto al (a los) autor(es) para que respondan a los mismos. El (Los) autor(es) tendrán 60 días para devolver el manuscrito modificado al Editor en Jefe, claramente indicando los cambios realizados o enviando una declaración escrita solidamente fundamentada del motivo por el cual no han acogido los comentarios de los revisores.

Derechos de reproducción (Copyrights)

Los autores de artículos aceptados para ser publicados, aceptarán de manera automática que los derechos de autor se transferirán a la revista.

Responsabilidad

Debido a la naturaleza intergubernamental de la UNESCO, la Organización se reserva los derechos de notificar en todas las publicaciones de Aqua-LAC que "*Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización*".

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication

The journal Aqua-LAC will be published every six months or twice a year.

Contents

The journal Aqua-LAC contains scientific, policy-related, legislative, educational, social, and communication articles and revisions related to water sciences and water resources topics. The content of the journal is aimed to meet the requirement of the scientific community, water resources managers, decision-makers, and the public in general.

Languages

The journal Aqua-LAC accepts manuscripts in English or Spanish and publishes abstracts in both languages.

Acceptance of manuscripts

Manuscripts submitted for publication must be originals that have not been submitted for possible publication elsewhere. Submitted manuscripts will be undergoing a review process. Invited articles or articles in special topical editions, will not necessarily be submitted to review.

The Editor in Chief, in consultation with the Board of Directors, reserves the right to reject a manuscript if its contents is deemed substantially or formally inconsistent with the editorial line of AQUA-LAC magazine

Review process

All manuscripts submitted for publication will be reviewed by at least two qualified reviewers, not necessarily members of the Editorial Committee. A manuscript can be accepted with or without comments or it can be rejected with due justification. In the first case, the manuscript will be returned to the author(s) for him/her/them to address the comments. The author(s) will have 60 days to return the modified manuscript to the Editor in Chief, clearly indicating the changes made or providing a written statement with solid fundaments for not addressing comments by the reviewers.

Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree the author rights to be transferred to the Journal. The author(s) are expected to sign a copyright form available in the Aqua-LAC webpage.

Disclaimer

Due to the intergovernmental nature of UNESCO, the organization reserves the right to state in all Aqua-LAC publications that "*The designations employed and the presentation of material throughout the journal do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The authors area responsible for the facts and opinions expressed therein, which are not necessarily those of UNESCO and do not commit the Organization*".

LA ECUACION DE ELDER COMO PUENTE ENTRE EL TRANSPORTE DE MASA, LA HIDRAULICA Y LA GEOMORFOLOGIA DE CAUCES NATURALES EN LOS ESTUDIOS DE CALIDAD DE AGUAS.

THE ELDER´S EQUATION AS A BRIDGE BETWEEN MASS TRANSPORT, HYDRAULICS AND GEOMORPHOLOGY OF NATURAL STREAMS IN QUALITY WATER STUDIES.

Alfredo José Constaín Aragón[1] y Jorge Luis Corredor Rivera[2]

Resumen:

Los estudios de calidad de aguas son herramientas complejas que usan softwares y técnicas matemáticas orientadas a modelar, predecir y verificar diversos eventos relacionados con amenazas al recurso agua. Este tipo de eventos está evolucionando en los tres escenarios de la vida real de los cauces: la hidráulica, el transporte dispersivo y la geomorfología. En el estado del arte de los procedimientos para medir cada escenario, ellos son de naturaleza diversa, lo que puede llevar a dificultades de integración de la información en estos modelos. En este artículo se analiza la ecuación de Elder como un puente entre estos dos campos, lo que permitiría un avance interesante en la obtención de información congruente ("homogénea") para optimizar el desarrollo de modelos.

El método aquí propuesto permite poner en perspectiva la naturaleza y los diversos problemas que han sido achacados a Elder, tratando de dilucidar nuevos enfoques que recuperarían dicha ecuación, ampliando los procesos de calibración y validación de los modelos de calidad de aguas. Se presentan detalladamente dos casos experimentales: un canal en USA y un cauce natural en Colombia.

Palabras clave: Estudios de calidad de aguas, hidráulica, dispersión, geomorfología

Abstract:

The studies of water quality are complex tools that use software and mathematical techniques oriented to model, predict and verify several events, related with threats to water resource. This type of events is evolving in three scenarios of streams 'real life: The Hydraulics, the Dispersive transport and the Geomorphology. In the state of the art of measurement procedures to each scenario, they are of diverse nature, which may lead to integration difficulties for the information in these models. In this article it is analyzed the Elder´s equation as a bridge between these two fields which would allow an interesting advance in acquisition of congruent ("homogeneous") data to optimize development of models.

The method proposed here allows putting in perspective the nature and the several problems that had assigned to Elder, trying elucidating new focus that recover this equation, widening the procedures of calibration and validation of quality water models. There are presented two detailed experimental cases: a channel in USA and a natural stream in Colombia.

Key words: Water quality studies, hydraulics, dispersion, geomorphology.

1. INTRODUCCIÓN

Corrientemente ha sido aceptado que las definiciones tempranas acerca del coeficiente longitudinal de transporte dispersivo *E*, en la dinámica de solutos en los flujos, como la ecuación de J.W. Elder por ejemplo, eran imprecisas a pesar de su solida fundamentación teórica. Este fue un serio traspié porque esta fórmula liga la dispersión con la geomorfología a través de la pendiente de fricción (y por lo tanto con la relación de Chezy-Manning) de una forma directa. Varias razones fueron aducidas para explicar esta derrota, entre ellas el uso equivocado del perfil de velocidad vertical en lugar de la distribución transversal de velocidad, probablemente más significativa en el caso de la dispersión cortante. Pero principalmente fue debido a que el método de "enrutamiento" de H.B. Fischer (tomado en esos días como el método de referencia) dio valores mayores que el de Elder, especialmente en cauces naturales.

Sin embargo, algunos desarrollos recientes indicarían que esta ecuación no es tan equivocada, ya que aunque la distribución transversal de velocidad puede ser eventualmente más significativa que la ver-

[1] Gerente Hydrocloro Ltda., Bogotá, Colombia, alfredo.constain@gmail.com

[2] Director Grupo de investigación "Visión Colombia Hídrica", Universidad Militar Nueva Granada, jorge.corredor@unimilitar.edu.co

Recibido: 05/08/2013
Aceptado: 04/02/2014

tical, no es correcto poner una en contra de la otra porque ambas son parte del *mismo* proceso, es decir no son *independientes* y es correcto usar *una o la otra* para representar ese proceso turbulento. También, una nueva definición para *E* como función del tiempo puede dar un nuevo conjunto de valores más precisos que pueden ajustarse propiamente con los resultados de Elder, enlazando además la hidráulica con el transporte de masa.

A partir de esto, se puede ver que en realidad un resultado de la ecuación de Elder *debe* ponerse sobre un punto específico de la curva *E(t).* Los análisis experimentales de este enfoque muestran que en los canales estos puntos afloran casi naturalmente, no así en los cauces naturales, que deben tener un procedimiento un poco más elaborado. En seguida se analizan los temas antecedentes que permiten una adecuada perspectiva del problema y la solución planteada.

1.1. El aporte de Taylor y Elder.

Para su aplicación exitosa, los modernos modelos de Calidad de agua dependen sustancialmente del entendimiento cabal de los movimientos del agua y de las transformaciones de los componentes en ella transportados. Su estructuración depende fundamentalmente pues de la *hidráulica* (donde va el agua) del *transporte de masa* (como afecta la advección y la dispersión a los contaminantes o al oxigeno, por ejemplo) y de la *geomorfología* del cauce en donde esto evoluciona.

Aunque la difusión y la dispersión son diferentes en su esencia (Holley E.R., 1969), en 1954 G.I. Taylor propuso una forma mono dimensional de ligarlas definiendo aproximadamente la dispersión como una difusión de carácter especial, tomando las desviaciones espaciales de velocidad, u´, (principalmente) y de concentración, *c´*, para formar un flujo de masa de soluto (kilogramos por unidad de tiempo y unidad de área) de forma proporcional al gradiente de concentración. Esto sobre la sección transversal en el punto de mayor concentración. La barra indica promedio (integración) espacial y las desviaciones se calculan con respecto a los valores medios referidos a la distribución de velocidad y al perfil de concentración, utilizando las aproximaciones de Reynolds y la analogía de Boussinesq (Fischer H.B., 1967).

$$\overline{c'u'} = -E\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad (1)$$

Para encontrar el coeficiente incognito *E,* Taylor aisló la sola desviación espacial de velocidad *u´* (efecto cortante como causa fundamental del efecto dispersivo en los flujos naturales) en una expresión integral triple para representar todo el dominio de la sección transversal del flujo. Aquí ε_z es el coeficiente vertical de difusión, *z* es la coordenada de profundidad y *h* es la profundidad

$$E = -\frac{1}{h}\int_0^h u'\int_0^z \frac{1}{\varepsilon_z}\int_0^z u'\,dzdzdz \qquad (2)$$

Puestas estas definiciones en un contexto más amplio como balance de masa, se puede establecer la ecuación final conservativa (sin reacciones químicas ni fuentes ni sumideros), llamada de Adveccion-dispersion. Aquí se ha calculado *C* como el promedio sobre la sección transversal y se han hecho ciertas simplificaciones y manipulaciones para que no aparezcan las desviaciones explícitamente. *U* es la velocidad media del flujo sobre esa sección transversal:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\frac{\partial C}{\partial x} = E\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (3)$$

La solución de (3) se expresa mediante la ecuación clásica de Fick, con *A* el área de la sección transversal del flujo y *M* la masa del soluto vertido al flujo.

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4tE}}\,e^{-\frac{(X-Ut)^2}{4Et}} \qquad (4)$$

Aunque las ecuaciones anteriores son la guía general del fenómeno descrito, es necesario disponer de datos específicos del cauce en cuanto a velocidad, geometría y transporte (*U, A* y *E*) cuando se quiere aplicar a casos concretos. La velocidad *U* se puede medir directamente y lo mismo *A* pero el valor de *E* hay que establecerlo mediante procedimientos alternos, de naturaleza teórica, experimental o con una mezcla de ambas. Taylor se propuso entonces hallar un primer valor para *E* en el caso de un tubo ideal infinitamente largo de radio *a*, en flujo uniforme. Para este caso especifico Taylor uso la ecuación general (2), suponiendo una distribución especifica *u´(z)* como la propuesta por Nikuradse para tubos ideales, hallando el valor para *E* en este caso como (Fischer H.B., 1966) donde *g* es la aceleración de la gravedad y *S* es la pendiente de fricción.:

$$E = 10.1a\sqrt{agS} \qquad (5)$$

En 1958 J.W. Elder, ampliando el alcance de la definición anterior, presentó una ecuación que enlazaba la dispersión (transporte) con la pendiente de fricción (geomorfología) facilitando el tratamiento unificado de estos dos campos. Para su desarrollo Elder partió de los enfoques y simplificaciones que originalmente introdujo G.I. Taylor en 1954, asumiendo flujo uniforme.

1.2. La ecuación de Elder.

Dado que los acuciantes problemas en los flujos naturales requerían una solución similar, J.W. Elder amplio el enfoque de Taylor a las corrientes a flujo abierto(Fischer H.B., 1968) Para ello utilizó como distribución especifica de *u´(z)* la ley logarítmica de perfil de velocidades en función de la profundidad, *h*. Aquí *g* es la aceleración de la gravedad y κ≈0.41 es la constante de Von Kárman.

$$u'(z) = \frac{\sqrt{hgS}}{\kappa}\left(1 + Ln\left(\frac{z}{h}\right)\right) \qquad (6)$$

Realizando las integraciones correspondientes en (2), partiendo de la función en (6) Elder obtuvo finalmente la definición para el Coeficiente Longitudinal de dispersión en flujos abiertos infinitamente anchos:

$$E = \frac{0.404}{\kappa^3}\sqrt{hgS} = 5.93h\sqrt{hgS} \qquad (7)$$

La importancia de este aporte radica en que enlaza de manera directa y simple el transporte de masa dispersivo con la geomorfología del flujo a través de la pendiente de fricción, *S*.

1.3. Las dificultades de la definición de Elder

No obstante las innegables ventajas de la definición anterior, su uso ha sido muy controvertido, decayendo con los años. Las razones para esta oposición son variadas pero entre las principales se cuentan: El uso de la distribución vertical en lugar de una transversal, supuestamente más correcta y los resultados numéricos más bajos que los obtenidos por el método de referencia ("Método de enrutamiento"). En seguida se analizan detalladamente ambos temas.

1.4. Naturaleza de las distribuciones de velocidad vertical y transversal

Corrientemente se critica la ecuación (7) por no representar supuestamente el fenómeno dispersivo ya que en las corrientes naturales normalmente las desviaciones de velocidad son más significativas en el eje transversal (ancho) que en el eje vertical (profundidad). (Seo I.W. & Baek K.O, 2002) Para avanzar en el análisis del problema, si se identifican las distribuciones vertical y transversal como las causas principales de la dispersión en los flujos naturales cortantes, es posible definir una combinación lineal diferencial para el coeficiente longitudinal de dispersión, suponiendo estas contribuciones como variables *independientes*:

$$E = f(v_z, v_y) \qquad (8)$$

Por lo tanto:

$$dE = \left(\frac{\partial E}{\partial v_z}\right)dv_z + \left(\frac{\partial E}{\partial v_y}\right)dv_y \qquad (9)$$

Esto quiere decir que en este caso, estrictamente hablando, la variación del Coeficiente de transporte longitudinal dependerá de dos factores a la vez, los cuales deben ser tenidos en cuenta necesariamente para obtener una definición precisa del parámetro.

$$dE = dE_{vz} + dE_{vy} \qquad (10)$$

Pero: ¿Son *independientes* estas dos componentes? Esta pregunta es interesante para ver la justificación de las ecuaciones (9) y (10) en la que las dos componentes *compiten necesariamente entre sí* para ajustar el valor total de la variable. Siguiendo las pautas clásicas sobre la naturaleza de las turbulencias establecidas por L.W. Richardson, G.I. Taylor y A.N. Kolmogorov, entre otros (Peralta Fabi R., 2001) las escalas del movimiento turbulento son tales que la energía que sostiene los movimientos irregulares de vorticidad va transitando desde entornos (torbellinos) mayores donde la geometría define las distancias características (en las que aun se aprecian correlaciones entre velocidades de puntos contiguos) hasta entornos (torbellinos) menores en donde domina la viscosidad, y la energía cinética (macroscópica) se convierte en calor (escala de Kolmogorov). En esta perspectiva, puede decirse que la turbulencia parece estructurarse de tal forma que la pérdida progresiva de correlación esta enlazada con la transferencia irreversible de calor hacia los alrededores, predominando entonces una naturaleza homogénea e isotrópica para la turbulencia. Si entendemos entonces la difusión como el mezclado irregular de las partículas de soluto debido a esa *turbulencia* y la dispersión como el desperdigamiento de partículas de soluto por efecto cortante en un campo de velocidades *turbulentas*, ambas asociadas íntimamente con el proceso irreversible de pérdida completa de energía libre, entonces la *naturaleza estadística* de difusión y dispersión debe ser la *misma* (homogénea).

Por lo tanto, es necesario en este punto remarcar que, aunque macroscópicamente en la sección transversal cualquiera que sea la distribución de velocidades en el eje *Y* (ancho), su naturaleza *estadística* es similar a la asociada a la distribución vertical (en el eje *Z*). Esto se puede ver también con claridad de otra forma si se piensa que la deducción de la distribución logarítmica "vertical" de velocidades realmente fue en un comienzo una distribución logarítmica "radial" ya que el entorno del análisis era un tubo infinitamente largo. Se puede pensar en la distribución transversal de velocidades como resultado de una distorsión topológica de este tubo ideal. Lo que era originalmente una distribución a lo largo del

radio (cualquier radio) se convierte en una distribución "transversal" como un radio excesivamente alargado mientras la distribución "vertical" es la misma distribución radial del tubo simétrico original. Pese a que las dos distribuciones pueden ser diferentes, su naturaleza estadística (representada por las fluctuaciones de velocidad v_r' y v_y') *es la misma* puesto que en la distribución "transversal" las desviaciones elementales de velocidad son idénticas en su naturaleza que en la distribución radial original. Figura 1.

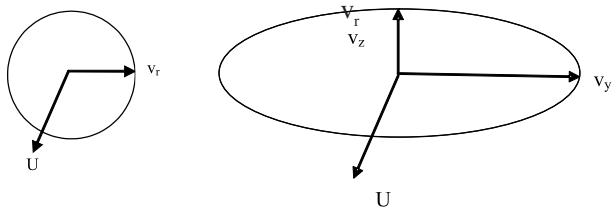


Figura 1. Similitud entre las distribuciones de velocidad

Esto implica que, tomadas como variables aleatorias las dos fluctuaciones de velocidad, la original radial, v_r', y la mutada transversal, v_y' son *dependientes.* Esto quiere decir que conocida una información sobre la naturaleza estadística de una variable, de inmediato se conoce una noticia sobre la otra variable. Esto es objetivamente así puesto que se puede asegurar que para la dispersión, las variables aleatorias están *normalmente* repartidas, actuando como variables Brownianas, con idéntica estructura probabilística en la escala más baja de Kolmogorov. (Prigogine I., 1996). Entonces si las dos variables son estadísticamente *dependientes* gracias a la uniformidad obtenida, se debe tener en cuenta otro esquema de representación matemática, diferente al representado en la ecuación (10), esta vez mejor representado por la ecuación (13).

$$v_y = f(v_z) \tag{11}$$

Y se puede escribir las ecuaciones (8) y (9) de esta nueva forma:

$$E = f(v_z) = g(v_y) \tag{12}$$

Y desaparece entonces el concepto de *competencia* entre las dos supuestas variables "independientes":

$$dE = dE_{vz} + dE_{vy} = k_1 dE_{vz} = k_2 dE_{vy} \tag{13}$$

Aquí *k1* y *k2* son factores de escala, en principio *diferentes* debido a que el efecto transversal puede ser eventualmente más pronunciado que el vertical (no isotropía debida al sesgo que impone la velocidad advectiva). Esto quiere decir que la ecuación de Elder que se basa en la distribución de velocidades verticales *es completa en sí misma* con respecto al fenómeno global, ya que no es necesario presentarla como en la ecuación (10) sino solo como en (13). Esta concepción esta entonces en contrario a la idea corriente de que el hecho de tener en cuenta *solo* esta distribución *vertical* (sin tener en cuenta las variaciones *transversales* de la velocidad) puede llevar a un error grueso.

1.5.- El método de "Routing" de Fischer y la definición de Elder.

A partir de la definición general (2) dada por Taylor se suscitó una intensa aplicación de la definición de Elder, especialmente en corrientes naturales. Aunque originalmente verificada exitosamente por su autor en un dispositivo plano muy ancho con una pequeña lamina de agua corriente, su aplicación a corrientes mayores y de naturaleza diferente se convirtió una necesidad. Para ese momento la definición de "referencia", o sea la expresión teórica contra la cual se contrastaban los resultados de las definiciones semi-empirica (como la de Elder) fue la del "cambio de momentos", tomada de la estadística matemática aplicada a las curvas Gaussianas de trazador, aquí σ_x es la desviación típica de la distribución espacial.

$$E = \frac{1}{2}\frac{d\sigma_x^2}{dt} \tag{14}$$

Esta expresión sin embargo fallaba en tanto las curvas a analizar fueran asimétricas (No-Fickianas) presentando diversos problemas interpretativos. Se trato de superar esta falencia mediante una definición "blindada" (supuestamente ideal ya que producía una respuesta "acoplada óptimamente" en un sentido estadístico) denominada "Método de Enrutamiento" de H.B. Fischer, consistente en un complejo y elaborado procedimiento de convolucion de una entrada de concentración conocida (datos experimentales) con una función de concentración ideal (Gaussiana) linealizada en una dimensión, donde los sufijos "o" corresponden a la forma de entrada y los "1" a la forma de salida (respuesta). Ecuación (15)

La aplicación sistemática de este método a la verificación de la definición de Elder, especialmente en ríos y quebradas, llevo al convencimiento de que la formula estaba en un error pues los resultados de referencia daban valores en ocasiones muy altos y con una gran dispersión.

$$c(x_1,t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(x_0,\tau)\frac{\exp\left(-\frac{[U(t_1-t_o-t+\tau]^2}{4E(t-t_o)}\right)}{\sqrt{4\pi E(t_1-t_o)}}Ud\tau \tag{15}$$

Pronto se vio que este método "ideal" adolecía del mismo problema del método inicial (cambio de mo-

mentos) pues requería de entradas no muy asimétricas para ser consistente. (Mc Quivey R.S. & Keefer T.N., 1974). Debido a esto y a la dificultad de su operación, hoy en día la aplicación del método de "enrutamiento" de Fischer ha sido reemplazada casi totalmente por otros métodos. Sin embargo, la idea de que la ecuación de Elder está equivocada ha persistido con los años. Se verá en seguida como una nueva definición del Coeficiente longitudinal de dispersión como función del tiempo, *E(t)*, puede dar luces a este viejo problema.

2.- METODOLOGÍA

Se proponen en seguida las ideas básicas de un nuevo modelo con cuya aplicación se puede obtener la información básica detrás de la ecuación de Elder.

2.1.- El concepto de Coeficiente Longitudinal de dispersión función del tiempo.

Para el desarrollo de este concepto se parte de la validez del principio de la inercia (relatividad clásica) planteado mediante la transformación de Galileo en el argumento exponencial de la ecuación (4). Sin embargo, se puede demostrar que este principio solo está *completamente* aplicado si el coeficiente *E* es una función del tiempo (pues solo así se llega a una descripción congruente de *dos* diferentes observadores inerciales). Esta corrección a la ecuación de Fick clásica lleva a la definición de la velocidad media advectiva en función del coeficiente de transporte (Constain A.J y Lemos R.A., 2011) donde ϕ es una función del tiempo (representando la evolución termodinámica de la dispersión) (Constain A.J., 2013a) y τ es el tiempo característico de la expansión Gaussiana, con $\tau=\beta t$ en donde $\beta\approx0.215$ según el primer término de una expansión de Poisson (Constain A.J., 2012a).

$$U = \frac{1}{\phi}\sqrt{\frac{2E}{\tau}} \tag{16}$$

Despejando *E*

$$E(t) = \frac{U^2\phi^2\beta\ t}{2} \tag{17}$$

Si *E* se expresa de esta forma, las representaciones teóricas de las curvas de trazador reales se pueden modelar apropiadamente, incluyendo su asimetría no Fickiana. Los diferentes parámetros y funciones que aparecen en este desarrollo se calculan a partir de las curvas de trazador como está indicado en (Constain A.J., 2012b)(Constain A.J., 2013b)

En casos experimentales esta función tiene una forma típica como se muestra en la Figura 2. Para una velocidad advectiva dada, *E* es también función de la distancia.

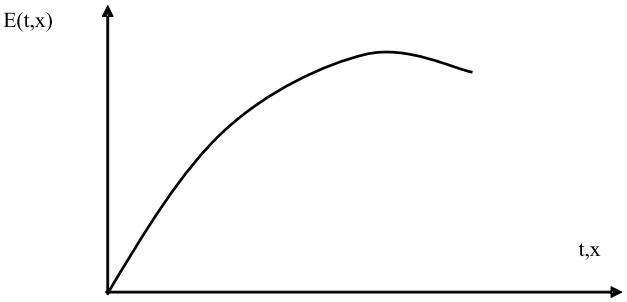


Figura 2. Coeficiente de transporte función del tiempo y/o distancia

2.2- El cálculo de Elder puesto en la perspectiva de *E(t)*

Se debe recordar que en la definición de Elder *E* es un valor constante *que no depende del tiempo* y por lo tanto, en relación con el Coeficiente definido en la ecuación (17), es un solo valor dentro de un rango de posibilidades, de acuerdo con la Figura 3.

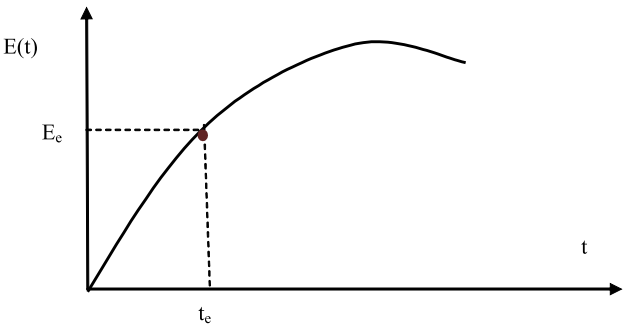


Figura 3. Solución de Elder como un punto de un rango

Así entonces, habrá un punto especial de dicha curva para la cual la definición de Elder es válida y con ello también los valores asociados de *S*, *C* y *n*; es decir el procedimiento analítico resuelve aproximadamente la geomorfología del flujo. Se parte de nuevo de la ecuación de Elder:

$$E_e = \frac{0.404}{\kappa^3}\,h\sqrt{hgS} \tag{18}$$

Para obtener este criterio igualemos las dos definiciones de velocidad media en el flujo:

$$\frac{1}{\phi}\sqrt{\frac{2E}{\tau}} = C\sqrt{RS} \tag{19}$$

A partir de esta igualdad, trataremos de obtener la definición de Elder, despejando *E* en el miembro izquierdo:

$$E = \left(\phi^2 \tau \frac{C^2}{2} RS \right) \qquad (20)$$

Igualando (18) a (16) y después de realizar algunas manipulaciones algebraicas, con un valor concreto para la constante universal de Von Kárman de $\kappa \approx 0.41$:

$$F = \left(\phi^2 \tau \frac{C^2}{2} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{S}{g\,h}} \right) = \frac{0.404}{\kappa^3} = 5.93 \qquad (21)$$

Esta función así definida servirá para hacer un proceso de validación por aproximaciones sucesivas para determinar la pendiente y la rugosidad total que vale para cada caso y de allí obtener los demás valores de la geomorfología del cauce en cuestión.

El método propuesto en este articulo consiste en ubicar en que punto de la curva *E(t)* se encuentra la definición inicial de Elder (E_e, t_e) ajustándola al punto correcto (E_{eo}, t_{eo}) como se explica a continuación. Figura 4.

El primer paso es despejar la pendiente *S* de la formula de Elder, igualando *E(t)* al valor especifico de prueba, hallado por trazadores, despejando la pendiente de la ecuación (18).

$$S = \frac{E(t)}{35.2 \times h^3 \times g} \qquad (22)$$

Un segundo paso es calcular el Coeficiente de resistencia para flujo uniforme de Chezy y el tercer paso es verificar la función "*F*" que concuerde con el valor clásico de Elder, ecuación (21). Se verifica si el resultado es correcto y de allí se calcula el Número de Manning (si es pertinente). Si no el resultado no es satisfactorio, se reitera el cálculo con otro dato de trazador, hasta que se consigue una aproximación apropiada.

2.3.- Un concepto ampliado para la rugosidad según Manning.

Aunque esta muy difundida la tabla de valores para la rugosidad según Manning, hay que advertir que esta normalmente corresponde a "elementos superficiales" o "rugosidad de grano", con valores relativamente bajos, correspondientes solo a ciertos tipos de cauce (Vélez J.I. et al, 2004). En particular, los cauces de montaña que se caracterizan por trazos muy irregulares con fuertes cambios en la forma del flujo, a menudo con proliferación de secuencia "piscina-rápido" en los que la pérdida de energía conducen a valores equivalentes de rugosidad bastantes altos, raramente tabulados en las tablas convencionales. Para incluir este tipo de cauce se plantea una definición ampliada para el Número de Manning:

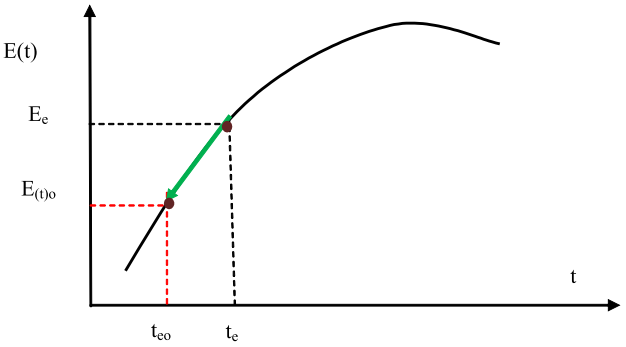


Figura 4. Ajuste por aproximación del punto ideal de Elder

$$n_{total} = n_{granos} + n_{forma} \qquad (23)$$

El procedimiento delineado en este artículo se supone concordante con el valor "total" de la rugosidad, según se verá en los casos experimentales. Esta concordancia tiene que ver con el hecho de que el fenómeno dispersivo tiene estrecha relación con las perdidas energéticas en el proceso (generación de entropía) y por lo tanto reflejara la información "integra" de formación de la resistencia al flujo. Correspondiendo a las complejas estructuras que priman en los ríos de montaña (Ugarte A. & Madrid-Aris M., 1994), las diversas fórmulas empíricas existentes sobre ríos de montaña por el contrario se centran en ciertos aspectos locales (subgerencia relativa, transporte de sedimento, tamaño del grano, etc.) que difícilmente pueden ser "integrales".

Entonces, el efecto de ambos sumandos combinados en (23) es limitar el valor efectivo de velocidad, lo cual es un resultado característico de los cauces con estructuras "piscina-rápido" con muy fuertes cambios en la forma del flujo, en los que no es raro encontrar valores efectivos de rugosidad según esta ecuación, del orden de 0.350 y posiblemente más altos aun.

3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES:

A continuación se aplican los criterios desarrollados en este artículo al canal Caltech en Pasadena, USA y a una corriente natural en Colombia con características marcadas de estructura "piscina-rápido" en las laderas del cerro oriental en Bogotá.

3.1.- Canal Caltech:

Se analizara el experimento realizado por H.B. Fischer en el canal del Mc Keck Laboratory del Caltech en 1966. La Figura 5 muestra una vista del canal y el

Cuadro 1 muestra los datos básicos de la hidráulica del canal en el que hace un vertimiento y dos mediciones secuenciales. Los datos mostrados son ajustados al análisis de las curvas de trazador (Constain A.J., 2013 c) En este caso se conoce a priori el valor de la pendiente de fricción, *S*.

Figura 5. Vista del canal de Caltech

Cuadro 1: Datos del experimento en el canal Caltech

Parámetro	**Especificación**
Condiciones del canal	L(max)= 40 m W= 1.09 m h=0.128 m R=0.104 m A= 0.140 m2 S= 0.0002 Ux=0.374 m/s Q= 50.8 l/s
Trazador	Sal común (NaCl)
Medidores de Conductividad	Seis (6) para asegurar una medición precisa en la sección transversal Sensibilidad de los sensores: 0.5 mgr/l Rango: Hasta 100 mgr/l
Medidores de velocidad	Tubos de Pitot estáticos 1/8 pulgada
Método de vertimiento:	Súbito en toda la sección a 14.08 m primero y a 24.8 m después

3.1.1.- Calculo de los valores para las dos curvas de trazador

Para este ejercicio se hacen las graficaciones correspondientes sobre las dos curvas de trazador específicas, tal como se muestra en la Figura 6 de las cuales se sacan los siguientes datos:

<u>Curva a X1=14.06 m.</u>

$$\phi_1 = 0.137$$

$$E_1(t) = 0.0106$$

$$\tau_1 = 8.16$$

Se despeja *S*:

$$S_1 = \frac{E_1^2}{35.2 \times h^3 \times g} = \frac{(0.0106)^2}{35.2 \times (0.128)^3 \times 9.81} = 0.00016$$

Se calcula el Coeficiente de Chezy:

$$C = \frac{U}{\sqrt{RS}} = \frac{0.374}{\sqrt{0.104 \times 0.00016}} = 91.6$$

Se verifica la Función "*F*":

$$F = \left(\phi^2 \tau \frac{C^2}{2} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{S}{g\,h}}\right) = (0.137)^2 \times 8.16 \times \frac{91.6^2}{2} \times \frac{0.104}{0.128} \times \sqrt{\frac{0.00016}{9.81 \times 0.128}} = 5.89$$

Curva a X2=25.06 m.

$$\phi_2 = 0.130$$

$$E_2(t) = 0.0169$$

$$\tau_2 = 14.5$$

Se despeja *S*:

$$S_2 = \frac{E_2^2}{35.2 \times h^3 \times g} = \frac{(0.0169)^2}{35.2 \times (0.128)^3 \times 9.81} = 0.00039$$

Se calcula el Coeficiente de Chezy:

$$C = \frac{U}{\sqrt{RS}} = \frac{0.374}{\sqrt{0.104 \times 0.00039}} = 58.7$$

Se verifica la Función "*F*":

$$F = \left(\phi^2 \tau \frac{C^2}{2} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{S}{g\,h}}\right) = (0.130)^2 \times 14.5 \times \frac{58.7^2}{2} \times \frac{0.104}{0.128} \times \sqrt{\frac{0.00039}{9.81 \times 0.128}} = 6.05$$

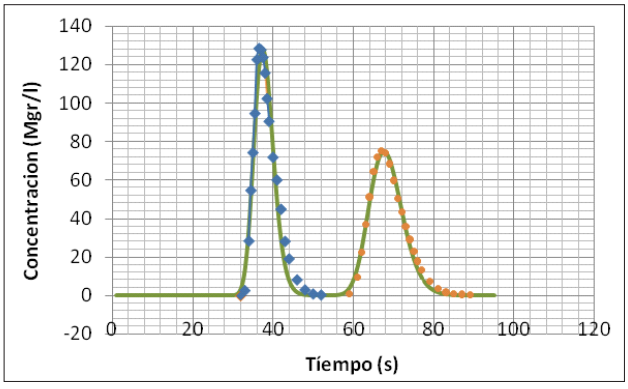


Figura 6. Curvas de trazador obtenidas

Curva a distancia interpolada.

Se ve que el primer valor está más bajo que 5.93 y el segundo más alto, por lo tanto se interpola un valor intermedio de trazador así:

$$E_3(t) = 0.0121$$

$$\phi_3^2 \times \tau_3 = 0.173$$

Se despeja S:

$$S_3 = \frac{E_3}{35.2 \times h^3 \times g} = \frac{(0.0121)^2}{35.2 \times (0.128)^3 \times 9.81} = 0.0002$$

Se calcula el Coeficiente de Chezy:

$$C = \frac{U}{\sqrt{RS}} = \frac{0.374}{\sqrt{0.104 \times 0.0002}} = 82.0$$

Se verifica la Función *"F"*:

$$F = \left(\phi^2 \tau \frac{C^2}{2} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{S}{g\,h}}\right) = (0.173) \times \frac{82^2}{2} \times \frac{0.104}{0.128} \times \sqrt{\frac{0.0002}{9.81 \times 0.128}} = 5.95$$

Como se puede comprobar este valor de *F* concuerda bastante bien con la formula de Elder y da exactamente el valor de la pendiente medida en el experimento. La curva de *E(X)* y la ubicación (en rojo) del valor de Elder correcto se muestra en la Figura 7.

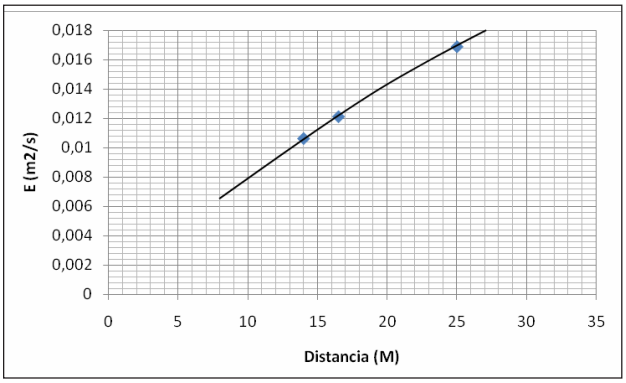


Figura 7. Punto optimo de Elder en E(x)

3.2.- Quebrada "La Vieja".

Se presenta ahora un cauce natural típico de montaña, la quebrada "La Vieja" en los cerros orientales de la capital colombiana, Bogotá. Este cauce se caracteriza por tener secuencia de represamientos y rápidos, por lo que presumiblemente el componente de cambio de forma del flujo sea el mayor responsable de la perdida de energía, mostrando un Numero de Manning significativamente mayor al asignado a

la sola rugosidad superficial. Este es un buen ejemplo de validez de la Ecuación de Elder debido a los antecedentes ya mencionados. En este caso no se conoce *a priori* el valor de la pendiente.

El grupo de estudio multidisciplinario de la Universidad Militar Nueva Granada y la empresa Hydrocloro Ltda. ha desarrollado diversos estudios de Calidad de Aguas en esta quebrada tomada como "piloto" por sus características especiales. En estas jornadas se ha utilizado el Equipo "Inírida Deep Flow" que permite estudios de trazadores (sal y Rodamina) en tiempo real, aplicando las nuevas ecuaciones que involucran a *E* como función del tiempo. Este equipo mide el caudal por dos métodos diferentes (uno de ellos *Qa* es mediante el principio de conservación de la masa calculando el área bajo la curva de trazador) así mismo da los valores de ϕ, *U* y *E* para cada punto de medición. Igualmente se tomaron datos de profundidades y anchuras del cauce para caracterizarlo en una "batimetría" simple.

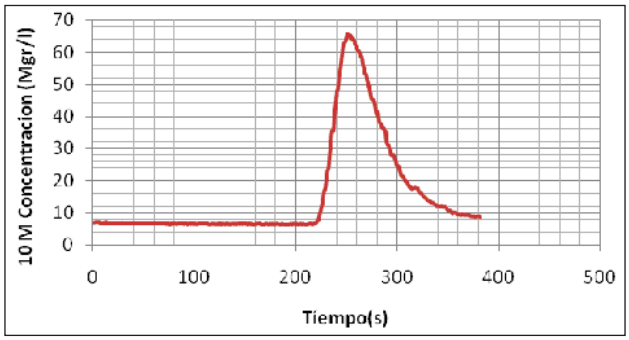
En la jornada de campo documentada se hicieron 5 vertimientos con sal común como trazador de las cuales se analizan solo 4 curvas de trazador por tener una de ellas (la primera) un error grueso en el momento de marcar su vertimiento. (Figura 8).

Figura 8. Aspectos del cauce y del equipo de medición

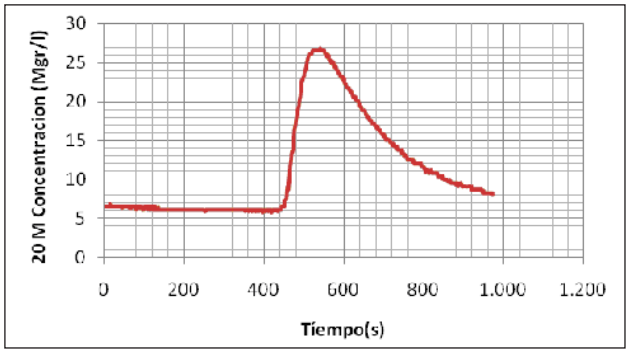
3.2.1- Información de las curvas de trazador:

Se muestran a continuación las curvas de trazador tomadas con el instrumento "IDF" en la quebrada "La Vieja". (Figura 9).

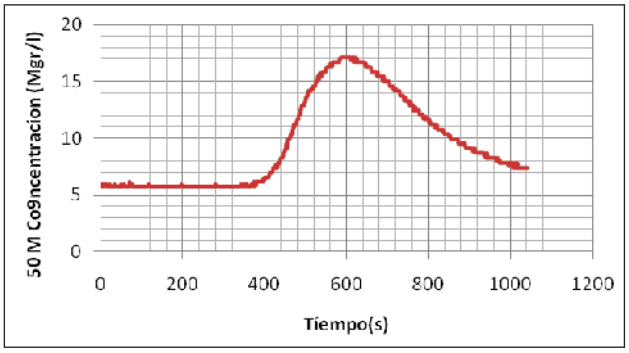
Aforo a X=10 M:



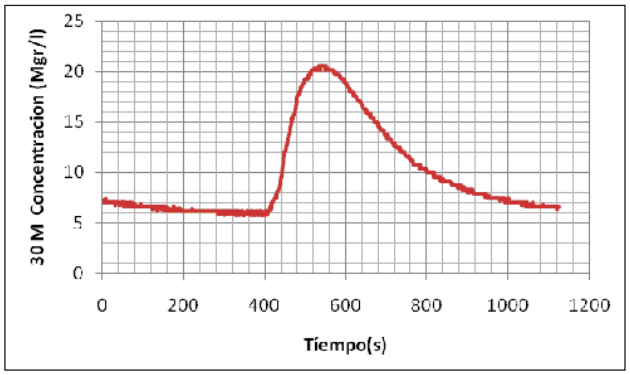
Aforo a X=20 M.



Aforo a X= 50 M.



Aforo a X=30 M.



Aforo a X=100 M.

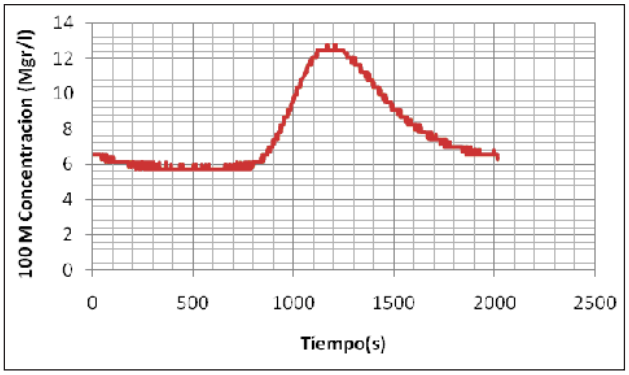


Figura 9. Curvas de trazador tomadas por el IDF en la quebrada.

3.2.2.-Datos de trazador tomados del IDF:

En el Cuadro 2 se muestran los datos de los 5 aforos con trazador.

Cuadro 2: datos de los 5 aforos con sal.

Aforo	U (M/s)	Q (M3/s)	Qa (M3/s)	Φ	Cp (Mgr/l)	E (M2/s)
X=10 m	0.141	0.0410	0.0389	0.663(*)	56.7	0.067
X=20 m	0.143	0.0375	0.0375	1.047	21.4	0.336
X=30 m	0.103	0.0325	0.0331	0.821	15.0	0.223
X=50 m	0.097	0.0324	0.0336	0.600	11.0	0.187
X=100 m	0.097	0.0335	0.0330	0.485	7.1	0.243
Promedio	0.116 M/s	0.0354	0.0335(**)			0.211
Caudal promedio		M3/s	0.0345			
Sección transversal promedio At(***)	0.30 M2					

(*) Este valor debe tener un error grueso por tiempo y se saca del cálculo.
(**) Error relativo entre *Q* y *Qa*: 5.7%
(***) At= Área de la sección transversal sacada del análisis por tiempos.

En el Cuadro 3 se muestran los datos de la geometría básica del cauce:

Cuadro 3: Datos de la geometría del cauce.

Aforo	Ancho W (M)	Profundidad lado izquierdo H1 (M)	Profundidad centro H2 (M)	Profundidad lado derecho H3 (M)	Profundidad Promedio (M)
X=0 m	1.00	0.20	0.14	0.10	0.15
X=10 m	1.80	0.09	-----	0.13	0.11
X=20 m	1.60	-----	-----	-----	------
X=30 m	1.40	0.03	-----	0.28	0.16
X=40 m	1.25	0.20	0.26	0.15	0.20
X=50 m	1.40	0.14	0.20	0.19	0.18
X=60 m	2.10	0.28	0.06	0.08	0.14
X=70 m	1.38	0.06	0.22	0.17	0.15
X=80 m	1.60	0.10	0.14	0.15	0.13
X=90 m	1.30	0.17	0.21	0.10	0.16
X=100 m	2.00	0.16	0.14	0.14	0.15
Ancho Promedio	1.68 M				0.17 M
Sección transversal Promedio Ag(*)					0.29 M2 (**)

(*) Ag= Área de la sección transversal sacada por geometría.
(**) Error relativo entre At y Ag: 3.5%

4.- DISCUSIÓN

Aplicando la metodología y las ecuaciones desarrolladas en este articulo para *S* y *F*, se aplican estos datos a hallar *C* y *n*, según el cuadro 4.

Cuadro 4: resultados de los cálculos para ajustar Elder.

Aforo	E (M2/s)	S	F	C	n
X=20 m	0.336	0.0740	5.27	1.34	0.535
X=30 m	0.223	0.0352	5.92	1.27	0.594
X=50 m	0.187	0.0174	5.97	1.69	0.449
X=100 m	0.243	0.0510	5.99	1.08	0.680
Promedio	0.247	0,0444	5.79		

Estos datos se grafican en la siguiente Figura 10

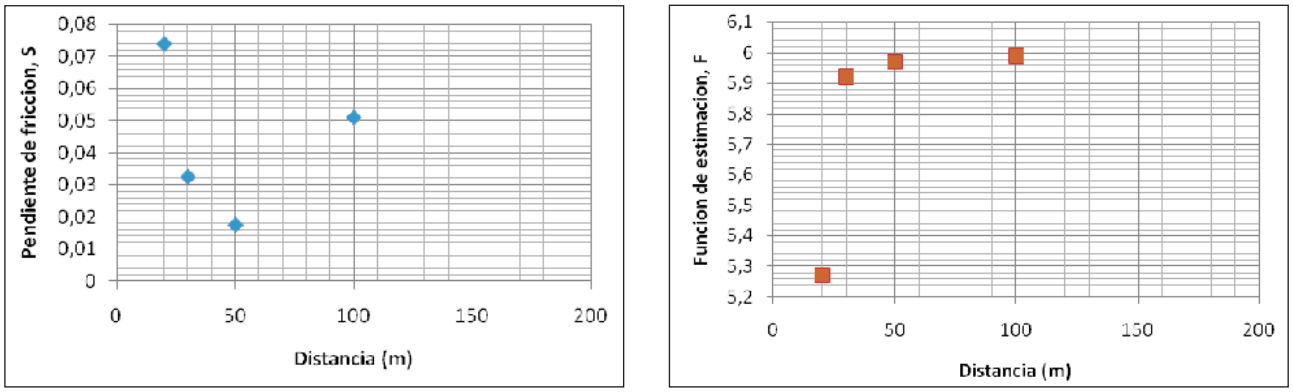


Figura 10. Curvas para las funciones de interés, S y F.

En el Cuadro de resultados, el aforo más cercano en *F* al valor de referencia es el dato a *X=30 m* por lo tanto se acepta que esta información será la representativa para caracterizar la geomorfología de este cauce. El valor bastante significativo del Numero de Manning es concordante con la estructura muy dispar del cauce en tanto se configuran secuencias de "piscina-rápido", lo cual no se explicaría por la sola rugosidad de grano. El resultado de este efecto de resistencia es una velocidad baja del flujo, en este caso.

Paso seguido se chequean los valores probables para establecer su congruencia en las formulas.

$$U = C\sqrt{RS} = 1.27\sqrt{0.186 \times 0.0352} = 0.103\, m/s$$

$$E = 5.93h\sqrt{hgS} = 5.93 \times 0.16\sqrt{0.16 \times 9.81 \times 0.0352} = 0.223\, m^2/s$$

Como se puede verificar, los datos obtenidos concuerdan bien con los esperados según los cuadros de resultados. Esta congruencia es lo que asegura la justeza de la aproximación propuesta. El ejercicio realizado entonces consistió en ubicar el punto específico para la definición de Elder (en rojo) dentro de la grafica de *E(X)*, tal como se muestra en la Figura 11.

5.-CONCLUSIONES:

1. No obstante las variadas fuentes de imprecisión que juegan en el desarrollo de esta metodología debido a las aproximaciones que se deben hacer, entre ellas: flujo uniforme, limitación por simplicidad del modelo (Manning por ejemplo) y los errores accidentales que imponen su distorsión especialmente en experimentos con pocos datos, los resultados obtenidos en los dos casos son satisfactorios al nivel de ingeniería.
2. Para los canales debido quizá a la preponderancia de flujo uniforme la identificación del punto de ubicación de E_e en la curva *E(t)* es relativamente más fácil por la poca dispersión de los datos, no tanto así para los flujos naturales.
3. La metodología presentada incluye eventualmente una extensión a los valores de rugosidad diferente a la superficial de grano, pudiendo reflejar los otros factores de pérdida de energía, como los cambios de forma y que influyen en la disminución del valor de la velocidad.
4. En principio, la posibilidad de calcular la geomorfología a partir de los datos de trazador abre una interesante fuente de información diferente a la observación subjetiva. Deberán ser acopiados más datos al respecto para afinar los criterios presentados.

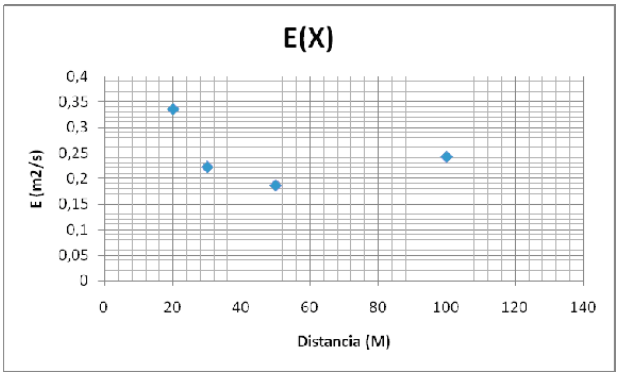


Figura 11. Ubicación optima de Elder en E(x)

6.-REFERENCIAS

Constain A.J., 2013. Aplicación de una ecuación de velocidad media en régimen no uniforme: Análisis detallado del transporte en el canal Caltech. Revista Ingeniería Civil No. 170. CEDEX. Pp. 103-122.

Constain A.J., 2013. .A thermodynamic view of tracer plume evolution: Complete mixing condition evaluation. *European Physical Journal*, Vol. 50. No. 20135003001.

Constain A.J. 2013. Avances en los estudios de Calidad de aguas: parámetros de la metodología ADZ en función de parámetros IDF. Revista ACODAL, No.232. Pp. 29-44. Bogotá.

Constain A.J. 2012. Definición y análisis de una función de evolución de solutos en flujos naturales, *Revista DYNA*, No. 175. Medellín. Pp. 173-181.

Constain A.J., 2012. Análisis crítico de la metodología de Zonas Muertas: TS y ADZ aplicadas al Rio Severn (Reino Unido) y propuesta de una metodología más simple usando Excel. Revista ACODAL, No.231. Bogotá. Pp. 46-71.

Constain A.J y Lemos R.A., 2011. Una ecuación de velocidad media del flujo en régimen no uniforme, su relación con el fenómeno de dispersión como función del tiempo y su aplicación a los estudios de calidad de agua. *Revista Ingeniería Civil*, No 164, CEDEX,. Pp 114-135.

Fischer H.B. 1966. *Longitudinal dispersion in laboratory and natural streams*. KHR-12, PhD thesis dissertation, Caltech,

Fischer H.B., 1967. The mechanics of dispersion in natural streams. *Journal of the Hydraulics division,* November, Pp. 187-216.

Fischer H.B., 1968. Dispersion predictions in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*. October, Pp 927-941.

Holley E.R., 1969. Unified view of diffusion and dispersion. *Journal of the Hydraulics division*, March,. Pp 621-631.

Mc Quivey R.S. & Keefer T.N. 1974. Simple method for predicting dispersion in streams. *Journal of the*

environmental engineering Division. August, Pp. 997-1011.

Peralta Fabi, R. 2001. *Fluidos, apellido de líquidos y gases*. La ciencia para todos 115. Fondo de cultura económica, México.

Prigogine I. 1996. *El fin de la certidumbres*. Taurus, Madrid.

Seo I.W. & Baek K.O., 2002. Estimation of longitudinal dispersion coefficients for streams. *River Flow 2002*. Balkema,. Pp 143-150.

Ugarte A. y Madrid-Aris M. 1994. Roughness coefficient in Mountain Rivers. *Hydraulic Engineering*, Vol. 1, ASCE, New York, Vol. 1.

Velez J.I., Posada L., Montoya M.M. y Montoya E., 2004. Metodología para estimar la resistencia al flujo en cauces de montaña. Memorias XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Brasil. Pp 1-8

ERRORES EN LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DE UNA ZONA DE PÁRAMO ANDINO DEBIDOS AL USO DE DATOS MENSUALES, DIARIOS Y HORARIOS

ERRORS IN THE ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION OF AN ANDEAN PÁRAMO REGION DUE TO THE USE OF MONTHLY, DAILY AND HOURLY DATA

Mario Córdova M.[1], Galo Carrillo R.[1], Rolando Célleri[1]

Resumen

La evapotranspiración de referencia (ETo) es un dato clave en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos, donde se la vincula con el cierre del balance hidrológico, el consumo de agua de los ecosistemas y el desarrollo de la vegetación. A pesar de esta importancia, la ETo ha sido muy poco estudiada en ecosistemas de páramo andino debido principalmente al escaso monitoreo meteorológico realizado en estos sitios y la poca disponibilidad de datos de calidad en diferentes escalas temporales, por lo que se conoce muy poco sobre su comportamiento. El objetivo de este estudio fue evaluar el error cometido en la estimación de la ETo mediante la ecuación de Penman-Monteith debido al efecto de usar los datos meteorológicos en periodos horarios, diarios y mensuales. La investigación fue realizada con datos meteorológicos muestreados cada 5 minutos durante un periodo de 2 años, entre marzo de 2011 y febrero de 2013, en el observatorio ecohidrológico ubicado en la cuenca del río Zhurucay (3780 m s.n.m.) en el sur de Ecuador. Esto se realizó calculando promedios horarios, diarios y mensuales de las variables y obteniendo el promedio diario mensual de la ETo para cada una de estas escalas. El error fue calculado respecto al valor proveniente de la estimación horaria que se asumió como la de referencia. Se observó que al ampliar el periodo en el cual se promedian las variables se obtienen valores más elevados de la ETo, resultando los cálculos diario y mensual en una sobrestimación respecto al horario. Se encontró un error relativo promedio mayor al 8% al realizar la estimación de la ETo con promedios diarios y un error mayor al 20% al utilizar datos mensuales. Estos resultados se contraponen a lo indicado en la publicación número 56 de FAO, en la que se afirma que el cálculo con promedios mensuales es muy similar al realizado con promedios diarios de las variables. Se concluyó que las considerables diferencias obtenidas al aumentar el tiempo de agregación de los datos se deben a la alta variabilidad diaria y subdiaria de las condiciones climáticas en este ecosistema de alta montaña, lo que causa que un promedio diario o mensual de las variables no refleje las condiciones reales del ambiente y su energía evaporativa real. Se evidencia que para el ecosistema en estudio la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith debe ser investigada más profundamente.
Palabras clave: evapotranspiración, ETo, meteorología, Penman-Monteith, páramo, Ecuador, Andes.

Abstract

Reference evapotranspiration (ETo) is a key parameter in hydrological, ecohydrological and biometeorological research; where the ETo is linked with the closure of the hydrological balance, ecosystems water consumption and vegetation growth. Despite this importance, ETo has been little studied in Andean ecosystems mainly due to the scarce meteorological monitoring and the resulting lack of high-quality, multi-temporal data sets. Therefore, ETo dynamics in the páramo ecosystem is still little known. Considering that in conventional meteorological stations only daily and monthly data is registered, it was of interest to perform a multi-temporal analysis of ETo dynamics. The objective of this study was to assess the errors in the estimation of ETo using the Penman-Monteith equation due to the effect of using hourly, daily and monthly meteorological data. This research was conducted with meteorological data registered every 5 minutes during a 2-year period, between March 2011 and February 2013, in the main station of the ecohydrological observatory in the Zhurucay river basin (3780 m a.s.l.) in southern Ecuador. This was done by calculating hourly, daily and monthly averages of the variables and estimating the monthly daily average ETo in each one of these time scales. The error was calculated in relation to the hourly estimation, which was taken as reference. Results show that higher values of ETo are obtained for longer periods of data aggregation. As a consequence, ETo calculated from daily and monthly data resulted in an overestimation when compared to the hourly estimation. It was found that the mean relative error was larger than 8 and 20 % for daily and monthly averages, respectively. These results disagree with the FAO Irrigation and Drainage paper No. 56 that sustains that the ETo estimation using monthly averages must be very similar to the one using daily data. It is concluded that the considerable differences in estimates are produced by the high daily and sub-daily variability of weather conditions found in this high-mountain ecosystem. This causes that the monthly or even daily average of the meteorological variables fail to represent the real environmental conditions of the páramo and its real evaporative energy. Therefore, for this particular ecosystem, the application of the Penman-Monteith equation must be further investigated.
Keywords: evapotranspiration, ETo, meteorology, Penman-Monteith, Andean páramo, Ecuador, Andes.

[1] Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. E-mail de contacto: marioandrescm@yahoo.com

Recibido: 28/09/2013
Aceptado: 25/10/2013

INTRODUCCIÓN

La Cordillera de los Andes atraviesa el callejón occidental de Sudamérica pasando por Ecuador, donde esta cadena montañosa configura la región Sierra. En la parte más alta de esta región, debajo de los glaciares, se encuentra el páramo. El páramo es un ecosistema andino que se encuentra aproximadamente entre los 3500 y 5000 metros de altura sobre el nivel del mar (Josse et. al., 2009). El páramo consiste de planicies y valles de origen glacial con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas cubiertas por suelos volcánicos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica; Este ecosistema ha sido estudiado con poca profundidad, y a pesar de su importancia en la producción de agua, la biodiversidad y la oferta de los servicios ecosistémicos, la investigación científica en el páramo de los Andes es escasa (Célleri y Feyen, 2009). Climáticamente se caracteriza por su baja presión atmosférica, alta radiación ultravioleta y vientos fuertes de dirección altamente variable; la temperatura decrece con una gradiente de entre 0,5 °C y 0,7 °C cada 100 m y presenta una temperatura promedio de 7°C a 3500 m de altura (Buytaert et. al., 2006).

La evapotranspiración (ET) es el intercambio de vapor de agua entre la superficie de la tierra y la atmósfera debido a evaporación directa y transpiración de la capa vegetal. Ésta depende de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura del aire, presión atmosférica, flujo de calor en el suelo y humedad relativa. Depende además de las características propias de cada cultivo. La evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) asume un cultivo con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70s m^{-1} y un albedo de 0,23; este cultivo se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme creciendo activamente, sombreando totalmente el suelo y con un adecuado aporte de agua (Allen et. al., 2006). Realizar el cálculo de la ETo resulta de gran utilidad porque al depender solamente de variables meteorológicas se pueden realizar comparaciones entre distintas regiones y localidades independientemente del cultivo.

La correcta estimación de la evapotranspiración es de gran importancia en estudios hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos donde se vincula el clima con el desarrollo de la vegetación, el consumo de agua de los ecosistemas y el cierre del balance hidrológico. Este parámetro no ha podido ser estudiado a profundidad en el páramo debido a la poca disponibilidad de datos de calidad por lo que se conoce muy poco de sus características, su variabilidad temporal y la sensibilidad a las variables meteorológicas que influyen en su cálculo; es por esto que un monitoreo meteorológico de calidad es de suma importancia para fines hidrológicos, ecohidrológicos y biometeorológicos debido a que es un proceso clave en estos campos de estudio.

Durante los últimos 50 años se han propuesto varios métodos teóricos y empíricos alrededor del mundo para estimar la evapotranspiración a partir de diferentes variables meteorológicas; entre los más difundidos se encuentran: el método de Hargreaves (Hargreaves et. al., 2003; Mohammadieh et. al., 2009; ElNesr et. al., 2011), el método de Priestley Taylor (Gunston and Batchelor, 1983; Summer and Jacobs, 2005), los métodos basados en la temperatura (Xu and Singh, 2001; Trajkovic, 2005), el método de Tanque Evaporímetro (Allen et. al., 2006; Raghuwanshi and Wallender, 1998), y el método de Penman-Monteith (Allen et. al., 2006; Hauviller et. al, 2006). Se han realizado además varias investigaciones en las cuales se han comparado estos distintos métodos (Yoder et. al., 2005; Alkaeed et. al., 2006, García et. al., 2004; Droogers and Allen, 2002). En un estudio sobre estimación diaria, mensual y anual de la evapotranspiración de referencia realizado en Ecuador (Vega y Jara, 2009) que cuenta con información meteorológica diaria correspondiente a temperatura y humedad relativa del aire, velocidad del viento, evaporación de bandeja y horas de sol se discute la aplicabilidad de diferentes métodos de estimación de la ETo en dos localidades del Ecuador ubicadas a 60 y 2838 m sobre el nivel del mar. En el estudio citado se calibra la evapotranspiración de referencia con distintos métodos, utilizando la de bandeja afectada por un coeficiente que fue determinado para cada localidad como referencia y se encuentra que la ecuación de Penman-Monteith mostró el peor desempeño entre los modelos utilizados.. Estos resultados negativos al utilizar la ecuación de Penman-Monteith se pueden deber a que solamente se contaba con datos diarios además de la carencia de valores observados de radiación. En un estudio realizado en el altiplano boliviano por García et. al. (2004) en 4 localidades ubicadas entre 3700 y 3820 m, los resultados demuestran el mejor desempeño de la ecuación de Penman-Monteith (inclusive cuando hay datos meteorológicos faltantes) en comparación con los métodos de Hargreaves y Thornthwaite; sin embargo, a pesar de que el altiplano es un ecosistema andino de igual altitud que el páramo sus condiciones climáticas son completamente diferentes. El estudio del funcionamiento, errores y desviaciones realizado con todos los métodos propuestos, ha llevado a la conclusión de que la ecuación combinada de Penman-Monteith describe de mejor manera el comportamiento de la ETo a nivel global, por lo que se ha decidido utilizar dicha ecuación en el presente estudio.

En general es muy difícil contar con datos meteorológicos completos a escala horaria y diaria (Stöckle et. al., 2004; Li et. al., 2009). En la Sierra ecuatoriana esto es aún más difícil por la limitación de infraestructura de observatorios meteorológicos/climáticos en zonas de difícil acceso. Es por esto que casi todos los proyectos de riego, meteorológicos e hidrológicos realizados en el país han sido diseñados con estimaciones mensuales de la ETo, debido a que estos

son los únicos datos con los que generalmente se cuenta en las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Para estimar el promedio diario mensual de la ETo se pueden utilizar los promedios mensuales de las variables meteorológicas. En FAO 56 (Allen et. al., 2006) se indica que este valor es similar al obtenido al realizar el promedio mensual del cálculo diario de la ETo. Sin embargo estas recomendaciones no han sido verificadas en un ecosistema de páramo.

Debido a los antecedentes expuestos y la falta de conocimiento al respecto, en el presente estudio se evaluará el error cometido en la estimación mensual de la ETo al comparar el cálculo obtenido con las tres distintas escalas de agregación de las variables (mensual, diaria y horaria). Esto se puede realizar gracias a que la estación principal del observatorio ecohidrológico Zhurucay del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca realiza una medición de muy alta frecuencia (5 minutos) de los parámetros involucrados en el cálculo; de esta manera se puede cuantificar aproximadamente los errores cometidos en el cálculo de la ETo con promedios diarios y mensuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio

La estación meteorológica está ubicada en el observatorio ecohidrológico del río Zhurucay, afluente del río Jubones que drena hacia el Océano Pacífico. El sitio de estudio se encuentra a 85 km al sudeste de la ciudad de Cuenca Azuay, Ecuador, a 3780 m s.n.m y coordenadas UTM 17M, 696439, 9661707. (Ver Figura 1)

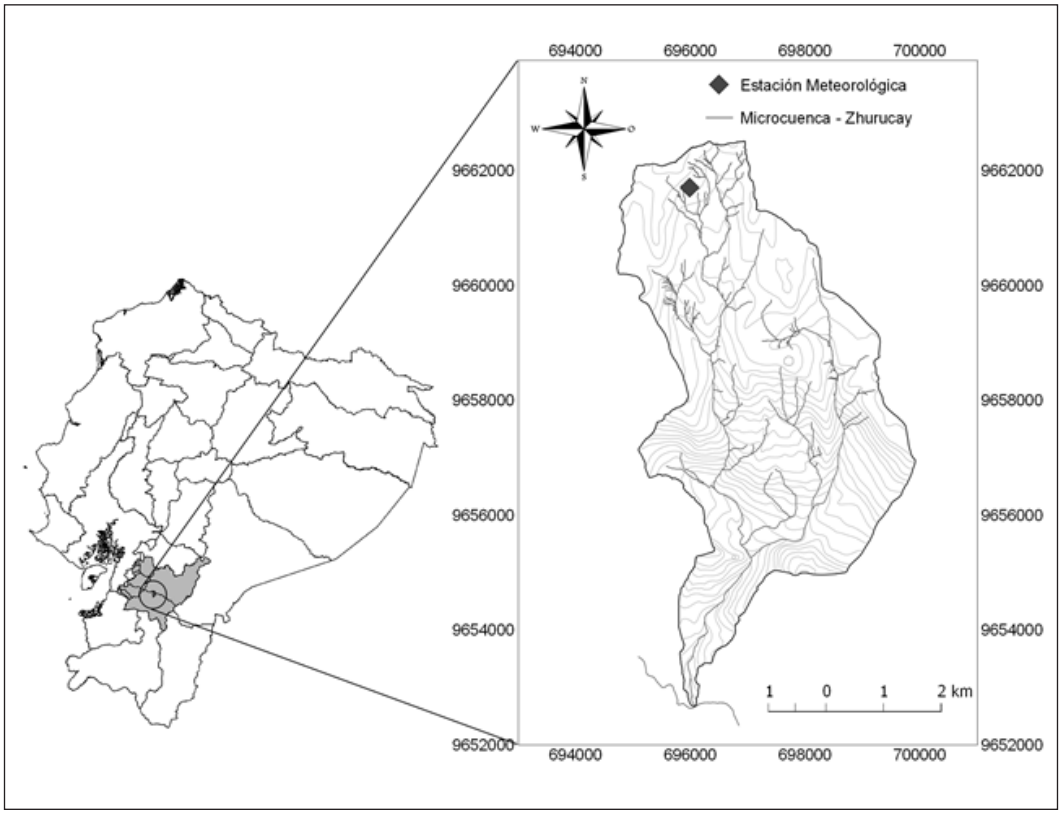


Figura 1. Ubicación geográfica de la estación meteorológica utilizada en el estudio .

El clima del sitio de estudio está influenciado por el régimen del Pacífico desde el lado oeste de la cuenca, aunque masas de aire continentales provenientes del lado amazónico también parecen presentar alguna influencia (Vuille et. al., 2000). La lluvia anual varía entre los 900 y 1600mm de acuerdo al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). La parte norte de la cuenca, en la que se encuentra la estación meteorológica está sobre la formación Quimsacocha que está compuesta de plagioclasas, feldespato y piroclastos andesíticos. La cobertura vegetal está principalmente compuesta de pajonal, almohadilla y bosque de Polylepis sp. Esta vegetación ha sido afectada por pastoreo extensivo de baja densidad y quemas en la parte baja de la cuenca El suelo tiene alto contenido de materia orgánica debido a su formación volcánica, el clima frío y húmedo y la baja presión atmosférica. (Mosquera et. al., 2012)

Datos

El estudio se realizó utilizando datos de la estación meteorológica principal del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca. La estación está equipada con un radiómetro neto CNR2 - Kipp and Zonen, un piranómetro CS300 - Campbell Scientific, un anemómetro y veleta Met One 34B - Windset Campbell Scientific, un sensor combinado de humedad relativa y temperatura del aire CS2150 - Temperature and Relative Humidity probe, Campbell Scientific. Los datos se han almacenado en un datalogger CR1000 - Measurement and Control Datalogger, Campbell Scientific. Para el estudio se utilizaron dos años completos de datos, desde el 1 de marzo de 2011 hasta el 28 de febrero de 2013.

Los sensores fueron programados para muestrear cada segundo las variables indicadas y el registro de datos se realiza de la siguiente manera: Temperatura promedio, máxima y mínima del aire [°C] cada 5 minutos; Radiación neta promedio [KW m^{-2}] cada 5 minutos; Radiación solar promedio [KW m^{-2}] y total [MJ m^{-2}] cada 5 minutos; Velocidad promedio del viento [m s^{-1}] cada 5 minutos, y Humedad relativa instantánea cada 5 minutos [%].

Cálculo del promedio diario mensual de la ETo

Se calculó el promedio diario mensual de la ETo mediante la ecuación de Penman-Monteith descrita en FAO56 (Allen et. al., 2006):

En donde ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm $día^{-1}$], Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ $m^{-2}día^{-1}$], G: flujo del calor de suelo [MJ $m^{-2}día^{-1}$], T: temperatura media del aire a 2 m de altura [°C], u2: velocidad del viento a 2 m de altura [m s^{-1}], es: presión de vapor de saturación [kPa], ea: presión real de vapor [kPa], (es – ea): déficit de presión de vapor [kPa], Δ: pendiente de la curva de presión de vapor [kPa $°C^{-1}$], Y: constante psicrométrica [kPa $°C^{-1}$], z: altura sobre el nivel del mar [m], HR: humedad relativa del aire [%]. Adicionalmente se considera lo indicado por Allen et. al., 2006 para los valores de Δ, G, T, P, ,,, y .

Cálculo del promedio diario de la ETo

El cálculo del promedio diario de la ETo se realiza con la ecuación 1. Se ingresan promedios diarios de las variables meteorológicas en la ecuación y se obtiene el valor de la ETo en mm $día^{-1}$.

Cálculo del promedio horario de la ETo

Para la determinación de la ETo en periodos horarios la ecuación de Penman-Monteith debe ser modificada, los cambios se deben a que en la ecuación 1 el cálculo de la ETo se obtiene en mm $día^{-1}$ mientras que mediante la ecuación 2 se la estima en mm $hora^{-1}$. Al introducir estas modificaciones la ecuación requiere de promedios horarios de las variables y toma la siguiente forma:

En donde ETo: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm $hora^{-1}$], Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m-2 $hora^{-1}$], G: flujo del calor de suelo [MJ m-2 $hora^{-1}$], T_{hr}: temperatura media del aire a 2 m de altura cada hora [°C], $e°(T_{hr})$:presión de saturación de vapor a temperatura del aire T_{hr} [kPa], ea: promedio horario de la presión real de vapor [kPa]. Los valores de Δ, Y, ea y G se calculan con las ecuaciones descritas por Allen et. al., 2006

Análisis de la calidad de las estimaciones

Para determinar la calidad de las estimaciones diarias y mensuales de la ETo en comparación con el cálculo horario Se utilizaron el Error absoluto (Ec. 3), Error relativo (Ec. 4) y Absolute Percent Bias (APB) (Ec.5). Todos los índices se calcularon con respecto a la estimación obtenida mediante el cálculo horario de la ETo debido a que ésta se acoge a la recomendación de FAO 56 (Allen et. al., 2006).

Donde Si: valor de la ETo correspondiente al cálculo diario o mensual, Oi: valor de la ETo correspondiente al cálculo horario y n: número de datos.

El APB es un indicador porcentual del error acumulado absoluto que se comete en una estimación , para su análisis se consideró el criterio de desempeño presentado por Tokay et. al. (2009) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterio de interpretación del desempeño para comparación entre series de datos estimados y observados, para el índice Absolute Percent Bias (APB).

APB	Desempeño
< 5	Excelente
5 – 10	Muy bueno
10 – 15	Bueno
15 – 20	Razonable
> 20	Pésimo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se promediaron la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación neta; horaria, diaria y mensualmente y se calculó el promedio de la ETo correspondiente a cada escala según la metodología descrita. Luego se agregaron los cálculos diario y horario para obtener el promedio diario mensual de la ETo y poder comparar los resultados de las tres escalas temporales. Los resultados se muestran en la Figura 2.

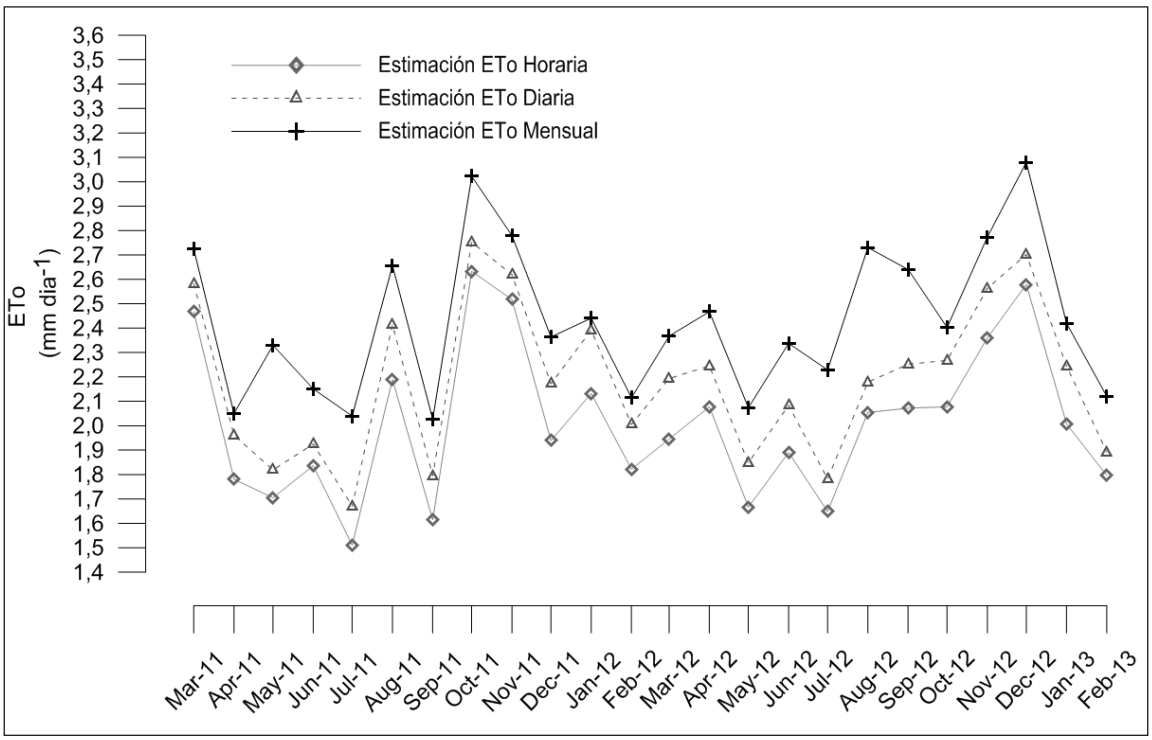


Figura 2. Promedio diario mensual de la ETo estimado a partir de distintas escalas temporales de cálculo.

En la Figura 2 se observa que las tres estimaciones presentan una distribución temporal muy similar. Se puede identificar que los valores de la ETo se sobrestiman a medida que aumenta el periodo en el que se promedian las variables: las magnitudes de la estimación diaria son siempre superiores a los valores de la estimación horaria, y las magnitudes de la estimación mensual son superiores a las de la estimación diaria. Al analizar detenidamente la variabilidad de las estimaciones se identifica que en mayo de 2011 hay un cambio en la concavidad de la gráfica del cálculo mensual con respecto a las otras dos. Al analizar lo sucedido en este mes se encontró la combinación de dos factores que causaron este error (ver Figura 3). El primero fue un sostenimiento del promedio diario de la temperatura, siempre mayor a 6°C, entre el 12 y el 25 de mayo. El segundo, y el más influyente sobre la estimación mensual de la ETo, fue un periodo de siete días consecutivos en los que no se registró lluvia entre el 15 y el 21 de mayo (Padrón, 2013). Estos dos fenómenos causaron que el ambiente se seque y provoque una caída de la humedad relativa, que el 19 de mayo alcanzó un valor promedio de 34,2% y un mínimo de 12,4%, el mínimo registrado durante todo el periodo de estudio; este registro extremo de humedad mínima, considerando que el promedio mensual correspondiente a mayo de 2011 fue mayor al 65%, causó una subestimación de la presión real de vapor en el cálculo mensual lo que derivó en esta excepcional sobrestimación de la ETo. Algo similar ocurrió en los meses de agosto y septiembre de 2012, en los que se registraron 14 y 8 días secos consecutivos, respectivamente, los que causaron humedades relativas mínimas excepcionales (24,5% y 35,8% respectivamente). Estos períodos con baja humedad relativa ocasionaron una alta sobrestimación de la ETo al agregar las variables mensualmente.

El diagrama de cajas de la distribución de la ETo (Figura 4), muestra claramente cómo la ETo se sobrestima al incrementar las escalas de agregación de datos. Se observa que toda la distribución aumenta junto con la escala temporal; la mediana, los cuartiles, e inclusive los valores máximo y mínimo. Al comparar los resultados del cálculo horario y el cálculo mensual se identifica que la mediana del cálculo mensual se encuentra cerca de 0,5 mm día^{-1} por encima de la correspondiente al cálculo horario (alrededor de un 20%). Los valores estimados con datos diarios producen una sobrestimación no muy elevada con relación a los cálculos con datos horarios, aunque la diferencia entre las medianas es de alrededor del 10%. Esto significa que al usar datos diarios y mensuales se estima una mayor pérdida de agua debido a evapotranspiración que cuando se usan datos horarios. Este error de sobrestimación de la ETo al aumentar el periodo de agregación de las variables provocaría una subestimación del agua disponible en el sistema al realizar balance hidrológico; lo que no resulta tan negativo, ya que de existir un error de subestimación, este ocasionaría consecuencias muy negativas en los programas de aprovechamiento de recursos hídricos ya que indicaría la existencia de mayor disponibilidad de agua que la real en los cauces.

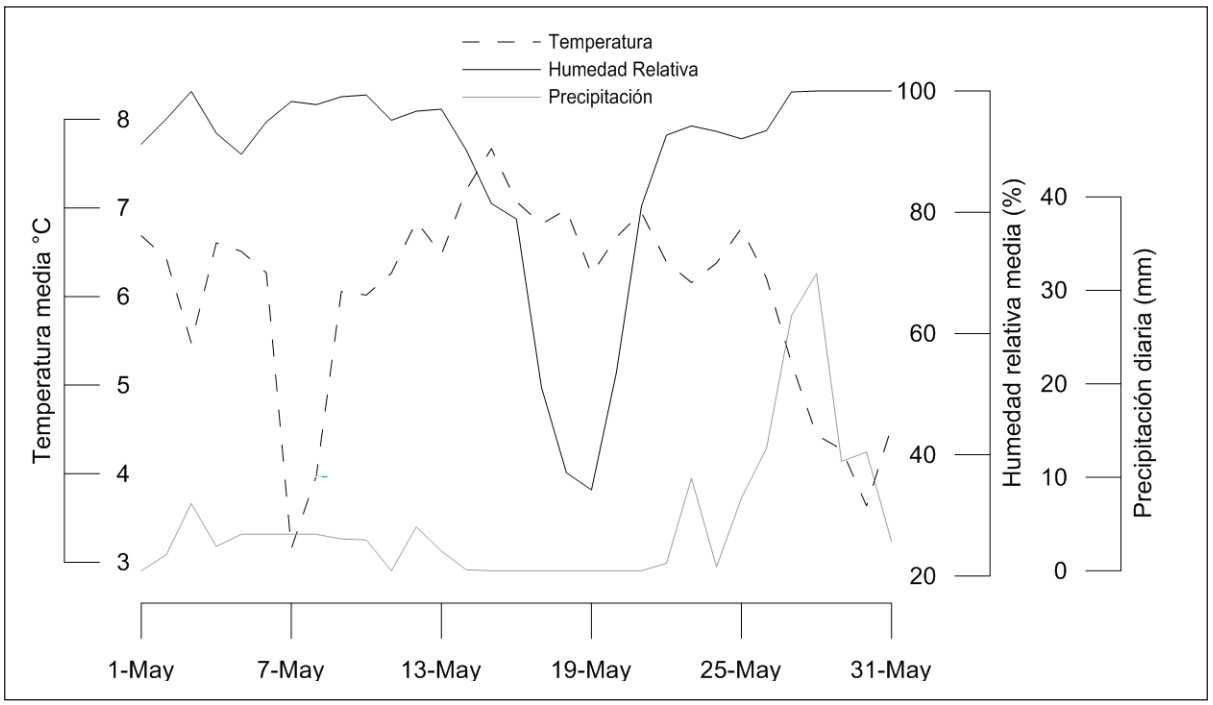


Figura 3. Promedio diario de la temperatura y humedad relativa y precipitación diaria correspondientes a mayo de 2011. La precipitación se midió con un disdrómetro láser (Thies Laser Precipitation Monitor) ubicado junto a la estación meteorológica.

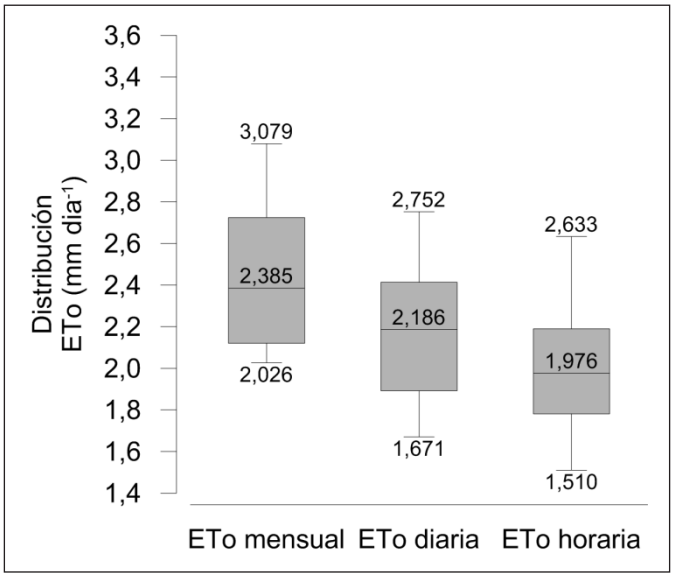


Figura 4. Diagrama de cajas de la distribución del promedio diario mensual de la ETo. Cada una de las cajas encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la mediana, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

Los resultados del análisis estadístico se resumen en la Tabla 2. Se observa que la calidad de la estimación con datos diarios es notablemente mejor a la obtenida con datos mensuales. Se obtuvieron valores del error relativo promedio y APB mayores al 8 y al 20% en los cálculos diario y mensual respectivamente, lo que marca una gran diferencia entre estas dos estimaciones ya que la primera es calificada como muy buena y la segunda como pésima. Al analizar los valores del error relativo promedio y máximo en las dos series de datos se identifica que en el cálculo mensual hay una diferencia mayor al 14% entre estos dos índices, mientras que la misma diferencia es del 4% en el cálculo diario; esto implica una mayor incertidumbre al calcular la ETo en periodos mensuales. Se observa además que hay una alta similitud entre los valores correspondientes del error relativo promedio y el APB en los dos casos, esto se debe a que los errores fueron siempre de sobrestimación y por lo tanto siempre positivos.

Tabla 2. Errores encontrados al comparar la ETo calculada con datos mensuales y diarios con relación a la ETo horaria.

Periodo de Cálculo					
Datos diarios vs horarios			**Datos mensuales vs horarios**		
	Error absoluto	**Error relativo**		**Error absoluto**	**Error relativo**
	(mm día^{-1})	**(%)**		**(mm día^{-1})**	**(%)**
Máximo	0,259	12,75	**Máximo**	0,676	36,68
Promedio	0,172	8,74	**Promedio**	0,428	22,04
APB (%)	8,36		**APB (%)**	20,74	
Evaluación según APB	Muy bueno		**Evaluación según APB**	Pésimo	

Para evaluar la diferencia media entre el cálculo mensual y diario se observa la diferencia entre sus errores relativos medios, que resulta ser de alrededor del 14%. Estos resultados son interesantes ya que la publicación 56 de FAO (Allen et. al., 2006) indica que normalmente los resultados del cálculo mensual de la ETo son muy similares a los del cálculo diario, lo cual no ocurre para este sitio de alta montaña. Esta diferencia se debe a la significativa variabilidad diaria y subdiaria de las variables meteorológicas encontrada en el ecosistema de páramo característico, en el cual, la nubosidad, la velocidad del viento y la radiación, tienen una considerable variación en periodos cortos de tiempo. Mientras se aumenta la escala de agregación de las variables, éstas dejan de representar la energía evaporativa real del ambiente.

La Figura 5 muestra la distribución del error absoluto en las estimaciones diaria y mensual de la ETo. Todos los valores son positivos en este diagrama de cajas, debido a que los errores resultaron ser siempre de sobrestimación. Al comparar los valores de los diagramas se observa una diferencia extrema entre los dos cálculos. Por ejemplo, se puede ver que el valor máximo del error en la estimación diaria es prácticamente igual al valor mínimo en la estimación mensual. La distribución más amplia en el cálculo mensual, cuya diferencia entre los valores máximo y mínimo es mayor a 0,4 mm día^{-1} mientras que este valor es apenas mayor a 0,1 mm día^{-1}, demuestra el aumento de la incertidumbre que conlleva el promediar las variables en periodos mayores de tiempo.

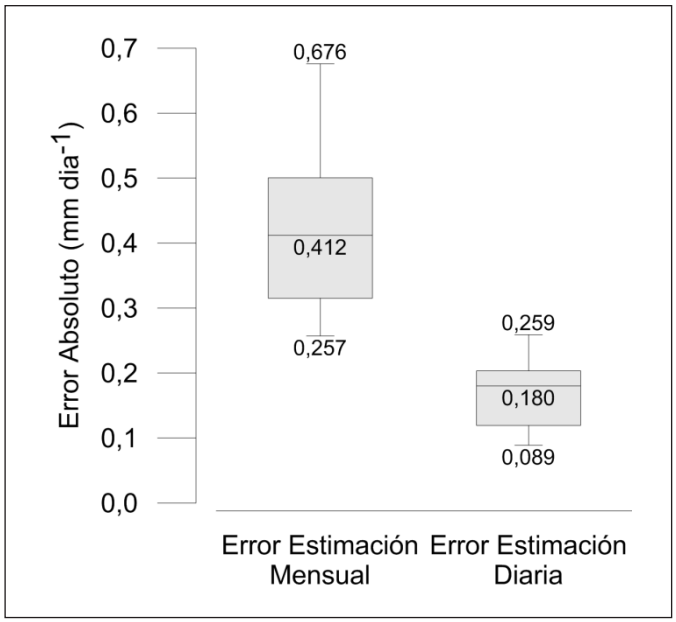


Figura 5. Diagrama de cajas de la distribución del error absoluto en el cálculo del promedio diario mensual de la ETo. Cada una de las cajas encierra los datos contenidos entre los cuartiles 0,25 y 0,75 y la línea central es la mediana, los extremos indican los valores máximo y mínimo.

CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo por objeto evaluar la calidad de las estimaciones de la ETo al utilizar distintas escalas temporales en el cálculo para el ecosistema de páramo. En especial nos interesaba conocer qué tan importante es contar con datos horarios para la estimación de la ETo, ya que en los estudios meteorológicos realizados en zonas remotas solamente se cuenta con estaciones convencionales y por lo tanto con datos diarios o mensuales. Esto se realizó promediando las variables meteorológicas involucradas en la ecuación de Penman-Monteith (radiación neta, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura) horaria, diaria y mensualmente usando datos de una estación meteorológica ubicada a 3800 m.

Al agregar los resultados del cálculo diario y horario, a promedio diario mensual, y compararlos con el cálculo mensual, se observó que a mayor escala de agregación de datos, mayor es el error cometido en la estimación de la ETo. Se halló que al promediar las variables en periodos mayores, se incurre en una sobrestimación de la ETo. Particularmente al aplicar estos valores sobrestimados de la ETo en el balance hidrológico se incurriría ventajosamente en una subestimación real de la cantidad de agua disponible en el sistema, ya que lo contrario a esto resultaría muy negativo en un proyecto de aprovechamiento de agua.

Para este sitio de alta montaña se determinó que existe baja confiabilidad al estimar la ETo con promedios mensuales de las variables, contrario a lo expresado por Allen et. al. (2006) en la publicación número 56 de FAO (Allen et. al., 2006), en la que se indica que las estimaciones mensuales son muy similares a las realizadas con un promedio diario de las variables. En este caso puntual se observó una diferencia promedio del 14% entre los dos cálculos. Se obtuvieron además valores del error relativo promedio y APB mayores al 20% al comparar el cálculo mensual con el horario, lo que califica la estimación como pésima. Este error se acentúa en este ecosistema, debido a la alta variabilidad diaria y subdiaria de las condiciones meteorológicas, que causa que los promedios para periodos largos no representen las condiciones reales del ambiente y se introduzcan errores en el cálculo. Esto supone que para el ecosistema en estudio se puede incurrir en un error significativo al estimar la ETo con datos promedios mensuales.

En base a lo observado en esta investigación y los errores que se revelan al calcular la ETo en periodos diarios y mensuales, se concluye que una estación meteorológica automática con una alta frecuencia de muestreo de las variables es de vital importancia para la correcta estimación de la ETo en cualquier aplicación hidrológica o de planificación agrícola. Para estudios futuros en los Andes se plantea la necesidad de disponer de un mayor número de estaciones meteorológicas automáticas, diferentes frecuencias de muestreo de las variables, y la investigación a nivel espacio-temporal de la evapotranspiración en gradientes de páramo andino.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a los proyectos PIC-08-460 y PIC-11-715 financiados por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador y la Universidad de Cuenca a través de su Dirección de Investigación. Los autores agradecen a Ryan Padrón por el procesamiento de datos del disdrómetro laser. Los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos ayudaron a mejorar la versión inicial del artículo.

REFERENCIAS

Alkaeed., O., F. Clariza, K. Jinno & A. Tsutsumi. 2006. Comparison of Several Reference Evapotranspiration Methods for Itoshima Peninsula Area, Fukuoka, Japan. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University 66(1): 1-14.

Allen, R.G., L. Pereira, D. Raes & M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Vol. 56, Food & Agriculture Org.

Buytaert, W., R. Célleri, B. De Bievre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers & R. Hoftede. 2006. Human Impact on the Hydrology of the Andean Páramos. Earth-Science Reviews 79(1-2): 53-72.

Célleri, R. & J. Feyen. 2009. The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. Mountain Research and Development 29(4): 350-355.

Droogers, P. & R. Allen. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Systems 16: 33-45.

ElNesr, M., A.A. Alazba & M.T Amin. 2011. Modified Hargreaves' Method as an Alternative to the Penman-Monteith Method in the Kingdom of Saudi Arabia. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 5(6): 1058–1069.

García, M., D. Raes, R. Allen, & C. Herbas. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). Agricultural and Forest Meteorology 125(1-2): 67-82.

Gunston, H. & C. H. Batchelor. 1983. A Comparison of the Priestley-Taylor and Penman Methods for Estimating Reference Crop Evapotranspiration in Tropical Countries. Agricultural Water Management 6(1): 65 – 77.

Hargreaves, G. H. & R. G. Allen. 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equa-

tion. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 129(1): 53–63.

Hauviller, AP., H. Días, D. Pérez, & M. Rodríguez Loustau. 2006. Un aporte a la estimación de la evapotranspiración del cultivo juvenil de arándano utilizando metodología según FAO en localidades de la Mesopotamia argentina. www.riegoyfertirriego.com

Josse, C., F. Cuesta, G. Navarro, V. Barrena, E. Cabrera, E. Chacón-Moreno, W. Ferreira, M. Peralvo, J. Saito & A. Tovar. 2009. Atlas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. Lima.

Kalthoff, N., M. Fiebig-Wittmaack, C. Meiβner, M. Kohle, M. Uriarte, I. Bischoff-Gausβ & E. Gonzales. 2006. The Energy Balance, Evapo-transpiration and Nocturnal Dew Deposition of an Arid Valley in the Andes. Journal of Arid Environments 65(3): 420-443.

Mohammadieh., M. Noori., M. Mohammadi, J. Helali, B. Nazari, B & T. Sohrabi. 2009. Evaluation of Hargreaves equation for calculating daily ETo (case study: North West of Iran). The Free Library.

Mosquera, G., P. Lazo, I. Cárdenas & P. Crespo. 2012. Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo: mediante el uso de los isótopos estables deuterio (δ2H) y oxígeno-18 (δ18O). Maskana 3(2): 87-105.

Padrón, R. 2013. Análisis de la estructura de la lluvia del páramo. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 100 p.

Raghuwanshi, NS. & WW. Wallender., 1998. Converting from Pan Evaporation to Evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 124(5): 275–277.

Stöckle, C., J. Kjelgaard, & G. Bellocchi. 2004. Evaluation of Estimated Weather Data for Calculating Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration. Irrigation Science 23(1): 39–46.

Sumner, D. & J. Jacobs. 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, Reference Evapotranspiration, and Pan Evaporation Methods to Estimate Pasture Evapotranspiration. Journal of Hydrology 308(1–4): 81–104.

Tokay, A., P. Bashor & V. McDowell. 2009. Comparison of Rain Gauge Measurements in the Mid-Atlantic Region. Journal of Hydrometeorology 11(2): 553–565.

Trajkovic, S. 2005. Temperature-based Approaches for Estimating Reference Evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131(4): 316–323.

Vega, C. & J. Jara. 2009. Estimación de la Evapotranspiración de Referencia Para dos Zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador. Engenharia Agrícola 29(3): 390-403.

Vuille, M., R.S. Bradley & F. Keimig. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 105 (D10): 12447-12460

Xu, C.-Y. & V. P. Singh. 2001. Evaluation and Generalization of Temperature-based Methods for Calculating Evaporation. Hydrological Processes 15(2): 305–319.

Yoder, RE., LO. Odhiambo & WC. Wright. 2005. Evaluation of Methods for Estimating Daily Reference Crop Evapotranspiration at a Site in the Humid Southeast United States. Applied Engineering in Agriculture 21(2): 197–202.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS DE SUMINISTRO DE AGUA DE LAS CIUDADES LA PAZ Y EL ALTO, BOLIVIA

HYDROLOGIC MODELING AND SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE ON WATER SUPPLY CATCHMENTS OF THE CITIES LA PAZ AND EL ALTO, BOLIVIA

Marisa Escobar[1], Nilo Lima[1], David Purkey[1], David Yates[2] y Laura Forni[1]

Resumen

En este artículo se presenta un enfoque útil para la modelación hidrológica de cuencas de suministro de agua potable incluyendo incertidumbres como el cambio climático. La modelación se realizó bajo la plataforma Water Evaluation And Planning System (WEAP) y comprende aporte de glaciares, precipitación-escorrentía, infraestructura hidráulica y demanda urbana.

El estudio caso está referido a los sistemas de agua de las ciudades de La Paz y El Alto que están ubicadas en la región Occidental de Bolivia. Estas ciudades son abastecidas de agua por pequeñas cuencas glaciares de la Cordillera Real. Por el crecimiento acelerado de la población especialmente en la ciudad de El Alto existen problemas en el abastecimiento de agua, y esto podría exacerbase por los impactos negativos del cambio climático por ejemplo el retroceso de los glaciares. Existe una necesidad urgente de conocer los posibles impactos del cambio climático, para esto es necesario tener un mayor conocimiento del potencial hídrico de las cuencas. Sin embargo, existen bastantes limitaciones respecto a la disponibilidad y calidad de los datos hidro-climáticas. Asimismo, no se cuenta con datos de escenarios de clima futuro a la escala de las cuencas que permitan modelar los posibles cambios esperados. En ese sentido en esta investigación se desarrolló una herramienta útil para la planificación de recursos hídricos bajo la incertidumbre de datos históricos y futuros. Los resultados para un horizonte de tiempo 2010-2050 muestran que los glaciares podrían desaparecer en los próximos 30 años, y esto podría tener implicaciones en la respuesta hidrológicas de las cuencas con la reducción de la oferta de agua. La ciudad de El Alto sería la más afectada, ya que se advierten serios problemas en el abastecimiento de agua. Se debe pensar en estudiar estrategias de nuevo almacenamiento de agua como medidas de adaptación al cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático, modelación hidrológica, retroceso glaciar, planificación de recursos hídricos, Cordillera Real

Abstract

In this paper we present a useful approach for modeling watershed hydrological water supply including uncertainties such as climate change. The modeling was carried out under the platform Water Evaluation And Planning System (WEAP) and includes contribution of glaciers, rainfall-runoff, hydraulic infrastructure and urban demand.

The study case framework focuses on water systems in La Paz and EL Alto cities in the Westside region of Bolivia. These cities have as water sources, small basins with glacier influence because of the “Cordillera Real” (The Andean Mountains). The fast population growth rate in these cities, especially El Alto City creates problems in drinking water availability, and it could increase because of negative effects of climate change. For these reasons is necessary to develop knowledge about the potential availability in these basins, however there is a lack of reliable weather data which make hard an ideal analysis. Information about future climatic sceneries in micro scale is not available also (at level of basins in our study area). In that sense this study has developed useful tools for water resource planning policies under the uncertainty of projected and historical data.

The results for threshold in time of 2010 to 2050 shows that glaciers could disappear in the next 30 years, and this could have implications in water resource availability, with the consequently reduction of water supply volume, El Alto city would be the most affected. Policy makers must to define new water sources to deal with climate change effects in long term.

Keywords: Climate change, hydrologic modeling, glacier retreat, water resources planning, Cordillera Real

INTRODUCCIÓN

El documento técnico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC según sus siglas en el idioma inglés) (Bates et al., 2008) indica que el cambio climático podría afectar de manera notable al ciclo hidrológico, alterando la intensidad y la distribución temporal y espacial de la precipitación, de la escorrentía de superficie y de la recarga de agua, produciendo impactos diversos sobre diferentes

[1] Stockholm Environment Institute–US Center, Davis, California, Water Group; marisa.escobar@sei-us.org

[2] National Center for Atmospheric Research; yates@ucar.edu

Recibido: 09/08/2013
Aceptado: 04/11/2013

ecosistemas naturales y actividades humanas. En el quinto informe del IPCC se reporta que la temperatura mundial se ha incrementado en 0.8 °C desde principios del siglo XX y se estima que a mediados del presente siglo de continuar las emisiones de CO_2 como viene aconteciendo en la actualidad habrá un aumento adicional de temperatura de 1.4 a 2.6°C. La principal conclusión del mencionado informe es que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y desde 1950 son muchos los cambios observados en todo el sistema climático que no tienen precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2013).

El *Cuarto Informe de Evaluación* del IPCC muestra que durante el siglo XX, los cambios en la precipitación en Latinoamérica fueron irregulares, con disminuciones en zonas tales como el flanco occidental de Los Andes y aumentos en otras zonas como el Cono Sur y en algunas zonas geográficas de la Región Andina en Ecuador, Bolivia y Argentina (IPCC, 2007). Las temperaturas medias por década muestran una tendencia ascendente en el Cono Sur y en la Región Andina, y también las temperaturas mínimas, mientras que las temperaturas máximas no muestran una tendencia uniforme.

La consecuencia más importante del aumento de las temperaturas en los últimos 30 años ha sido el retroceso crítico de glaciares en Bolivia, Perú, Colombia y Ecuador. Esto ha aumentado la escorrentía, pero los glaciares son importantes depósitos de agua, y se han disminuido e inclusive agotado en algunos lugares. Los estudios indican que en los próximos 15 años, los pequeños glaciares andinos podrían desaparecer, afectando la disponibilidad de agua y la generación de energía hidroeléctrica, mientras que los glaciares más grandes van a seguir contrayéndose (Ramirez et al., 2001; Francou et al., 2003; Bates et al., 2008). Los cambios en las contribuciones de agua de los glaciares afectarán al suministro de agua para múltiples usos, incluyendo la agricultura a pequeña y gran escala, los servicios urbanos de agua y la energía hidroeléctrica.

A lo largo de la región Andina existen además otros agentes de cambio y presiones sobre los sistemas hidrológicos que proveen agua, como la urbanización y explosión demográfica por migración del campo a la ciudad, por ejemplo las ciudades de La Paz y El Alto (Figura 1); las mismas están ubicadas en la Provincia Murillo del Departamento de La Paz del Estado Plurinacional de Bolivia (Figura 2).

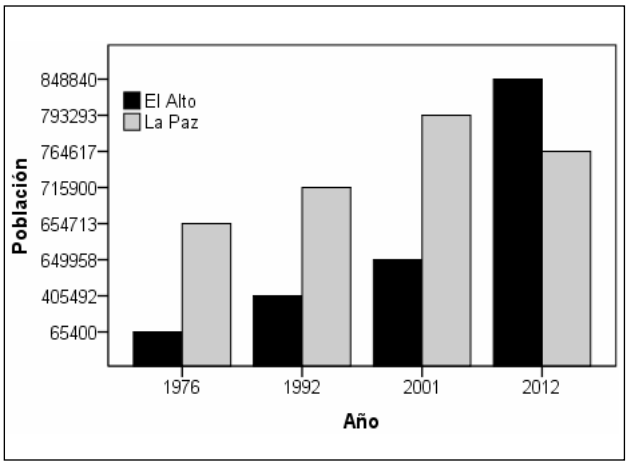


Figura 1. Crecimiento de población en las ciudades de La Paz y El Alto (Fuente: Instituto Nacional de Estadística)

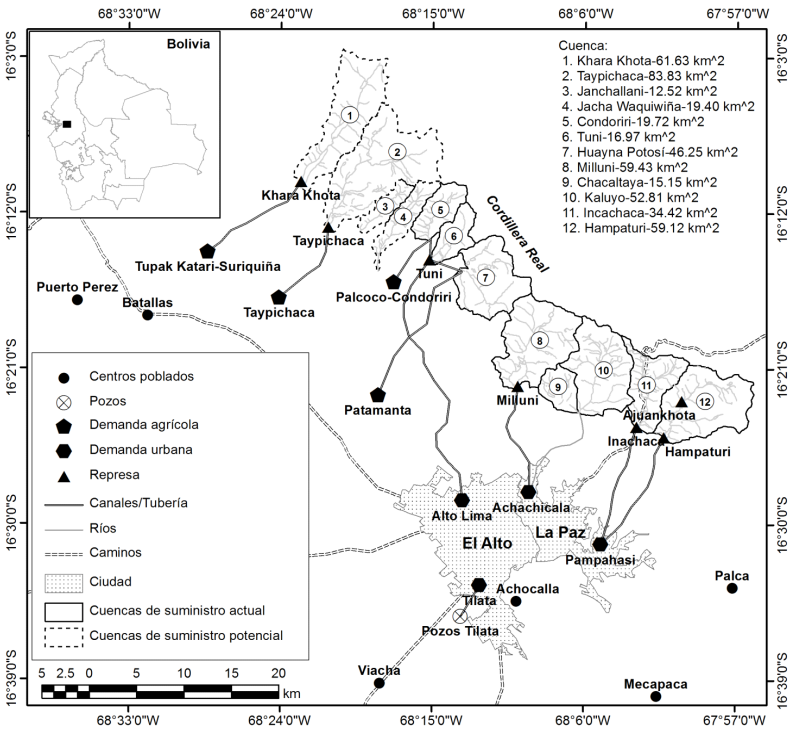


Figura 2. Área de estudio de la modelación hidrológica del sistema de agua de La Paz y El Alto (Fuente: Elaboración propia)

En la actualidad operan cuatro sistemas de agua potable en La Paz y El Alto: Achachicala, Pampahasi, El Alto y Tilata (Figura 2). La fuente de suministro de agua de los tres primeros son pequeñas cuencas hidrográficas ubicadas en la Cordillera Real; el aporte de estas cuencas se almacena en represas y se conduce a las plantas de tratamiento. El sistema Tilata aprovecha aguas subterráneas mediante 32 pozos de una profundidad promedio de 90 metros. Desde el 2007, el abastecimiento de agua a ambas ciudades ha estado a cargo de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS).

Las cuencas de suministro de El Alto cuentan con una importante presencia de glaciares, el derretimiento acelerado de glaciares debido a los cambios globales podrían tener implicaciones en la respuesta hidrológica de las cuencas (Ramírez, 2008). El análisis multitemporal de los glaciares de la Cordillera Real sobre restitución de fotografías aéreas muestra que los glaciares perdieron el 43% de su volumen entre 1963 y 2006 (Soruco et al., 2009). En el caso específico de las cuencas Condoriri ha perdido 44% de su superficie glaciar y la cuenca Tuni el 55% entre 1956 y 2006 y las tendencias indican que desaparecerían en los próximos 30 años (Ramírez 2008). Un análisis para el periodo 1939-1998 determinaron que la temperatura en los Andes tropicales ha aumentado en 0.1 a 0.11 °C/década desde 1939 (Vuille & Bradley, 2000).

Existe una necesidad urgente de comprender los impactos del cambio climático sobre el suministro de agua, de manera que esto permita tomar acciones para garantizar la cobertura de los requerimientos de agua futuros. Para evaluar el potencial hidrológico de las cuencas existen limitaciones referentes a la disponibilidad y calidad de los datos. El monitoreo de variables climáticas como temperatura y precipitación es muy deficiente, ya sea a nivel temporal y espacial. Por iniciativa del programa GREAT-ICE del Instituto francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) y el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés (IHH-UMSA) en el año 1991 se inició el monitoreo de algunos glaciares tropicales en la Cordillera Real (Zongo), y posteriormente instalaron sensores para el monitoreo de niveles de agua en las cuencas Condoriri, Tuni y Huayna Potosí (sistema El Alto). Por otro lado, la EPSAS en el año 2000 instaló pluviómetros cerca de los embalses. Sin duda estas acciones fueron un gran avance para poder comprender el ciclo hidrológico de las cuencas, es así que en base a estos esfuerzos se han realizado una serie de trabajos que permitieron generar datos y conocimiento inicial sobre el comportamiento de la hidrología regional. La otra limitación es la falta de datos de escenarios de clima futuro a la escala de cuencas pequeñas, que permitan modelar los aportes de agua futuro y estimar las perdidas probables (Ramírez, 2008).

En este contexto, la pregunta de investigación es ¿qué tipo de herramientas se pueden desarrollar para contribuir a la planificación del recurso hídrico de la región bajo el contexto de incertidumbre de datos históricos y futuros? Para responder a esta pregunta, en esta investigación se realizó una modelación hidrológica bajo la plataforma Water Evaluation And Planning System (WEAP) en las cuencas de actual suministro de las ciudades La Paz y El Alto, y en las posibles cuencas alternativas planteadas en el Plan Maestro de Agua Potable del año 1994. Asimismo se buscó evaluar cuales podrían ser las implicaciones del cambio del clima futuro en el abastecimiento de agua en un horizonte de tiempo 2011-2050 bajo un ambiente de incertidumbres. El enfoque y el tipo de modelo desarrollado podrían ser útiles en el proceso de toma de decisiones en la planificación de recursos hídricos y adaptación al cambio climático.

METODOLOGÍA

Modelo WEAP

La plataforma WEAP como herramienta para la panificación de recursos hídricos incluye un modelo de balance hídrico para representar los procesos hidrológicos dentro de un sistema de cuencas (Yates et al., 2005a, 2005b). Este algoritmo permite representar el comportamiento del balance hídrico desde las precipitaciones en la cuenca alta con características fisiográficas de montaña con pendientes escarpadas a muy escarpadas y valles en forma de V, y cómo estas contribuyen al flujo base de las aguas subterráneas. Segundo, en la cuenca baja, zona de llanura, contribuyen a los acuíferos aluviales y estos pueden contribuir a los ríos o pérdidas por filtraciones, es decir existe una interacción.

Se trata de un modelo cuasi físico unidimensional que puede utilizarse a diferentes pasos de tiempo. En el caso de este estudio, se planteó el uso de un paso de tiempo mensual que permite una mirada hacia las proyecciones de cambio climático futuras. El algoritmo requiere datos de entrada como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento de nieve, latitud, y cobertura vegetal; además se debe delimitar las unidades básicas de modelación, *catchments*, en base a las cuencas y cobertura vegetal (CCG-UC & SEI, 2009). De esta manera se estiman los componentes del balance hidrológico como evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial y flujo base. Los datos de caudales observados permiten la calibración del modelo. En la zonificación de las unidades básicas de modelación en zonas montañosas se debe incluir la altitud, lo cual permite una mejor representación de los procesos hidrológicos (CCG-UC & SEI, 2009).

En las cuencas de suministro de La Paz y El Alto existen glaciares tropicales, por tanto existe la necesidad de evaluar el aporte de los mismos, el WEAP no cuenta con un modelo hidroglaciológico. Sin embargo se han desarrollado algunos metodologías en la cuenca del río Santa-Perú modificando el modelo

grado-día a grado-mes (Condom et al., 2012), otro en los glaciares de Himalaya con modificación al anterior usando la radiación neta en vez del factor grado-mes (Mehta et al., 2010) y en la cuenca Paute-Ecuador simplificando la representación del modelo grado-mes, denominándolo Ice-KISS (Pouget, 2011). Estos algoritmos son acoplados al modelo de precipitación-escorrentía en WEAP. En esta investigación se utilizó modelo desarrollado en la cuenca del rio Santa.

El modelo glaciar grado mes modela la dinámica de la extensión de la superficie del glaciar y el aporte de agua a la salida de la cuenca glaciar (Condom et a, 2012). Cada banda de elevación en cada cuenca se divide en zonas glaciares y no glaciares, los glaciares son conceptualizados por el modelo grado-mes. El área inicial del glaciar que puede ser obtenido de imágenes satelitales o fotografías aéreas es usada para el cálculo del volumen glaciar inicial mediante una ecuación empírica (Bahr et al., 1997). Para cada mes del año hidrológico el volumen de escurrimiento superficial en la cuenca es la suma de la fusión de nieve, y glaciar y el escurrimiento modelado por *Soil Moisture (modelo hidrológico de WEAP)* en zonas no glaciares. Al final del año hidrológico calcula el balance de masas para evaluar los cambios en el volumen total del glaciar (Condom et al., 2012). El modelo glaciar utiliza solo tres parámetros: $T_{0,}$ que es la temperatura crítica para la fusión glacial, a_{ice} y $a_{sonw,}$ factor grado-mes de hielo y nieve respectivamente.

Disponibilidad y procesamiento de datos de entrada

En las cuencas de suministro de agua potable (vertiente Oeste de la Cordillera Real) existe una deficiencia en el monitoreo de las variables de base climática. EPSAS cuenta con un base de datos de pluviometría desde el año 2000, pero esta red está ubicada en las represas (zona baja). En general, no existe información en la zona alta, sin embargo existen datos en la cuenca glaciar Zongo desde el año 1991, la cual queda en la vertiente Este de la Cordillera Real. En las ciudades La Paz y El Alto existen datos extensos de precipitación, temperatura, humedad relativa y vientos en las estaciones meteorológicas San Calixto, Laykacota y El Alto-Aeropuerto desde el año 1917, 1945 y 1942 respectivamente. De las cuatro posibles nuevas cuencas de suministro ubicadas al Norte del área de modelación, en tres no existente ninguna información climática. En la cuenca Khara Khota donde si existen datos, se encuentra información sobre precipitación, humedad relativa, temperatura y viento.

Respecto a la información sobre caudales medidos, en la mayoría de las cuencas de suministro actual especialmente en Tuni, Condoriri y Huayna Potosí existen base de datos del programa GREAT ICE-IRD. Estos puntos de medición son de mucha importancia ya que están ubicados a una altitud por encima de 4500 m donde existe poca intervención humana que en general es la característica de todas las cuencas en estudio. Por otro lado, el SENAMHI cuenta con puntos de medición en la zona aguas abajo de las cuencas Hampaturi y Kaluyo, pero debido a su ubicación estos puntos son más representativos de zonas donde existe bastante intervención humana, como agricultura y zonas peri-urbanas.

Los datos de precipitación fueron procesados para el análisis de homogeneidad por el método Vector Regional (Hiez, 1977; Brunet-Moret, 1979) que está incorporado en el software *Hydraccess (Vauchel, 2005)*. Las estaciones Hichucota, Tuni, Milluni, Alto Achachicala, Incachaca y Hampaturi fueron seleccionadas como estaciones base para la modelación en WEAP, ya que estas se encuentran ubicadas al interior de las cuencas. Los vacíos de datos en los registros fueron rellenados por correlación múltiple con estaciones con registros extensos y continuos como San Calixto, Laykacota y El Alto-Aeropuerto. Con base en la información procesada se generaron isoyetas mediante interpolación con funciones de base radial (Figura 3). Por otra parte, para el cálculo de la temperatura a diferentes altitudes se usó un gradiente térmico vertical de 0.800°C/100 m, estimado después de analizar las estaciones Achumani, Laykacota, El Alto-Aeropuerto, Alto Achachicala, Hichucota y Mevis (Zongo).

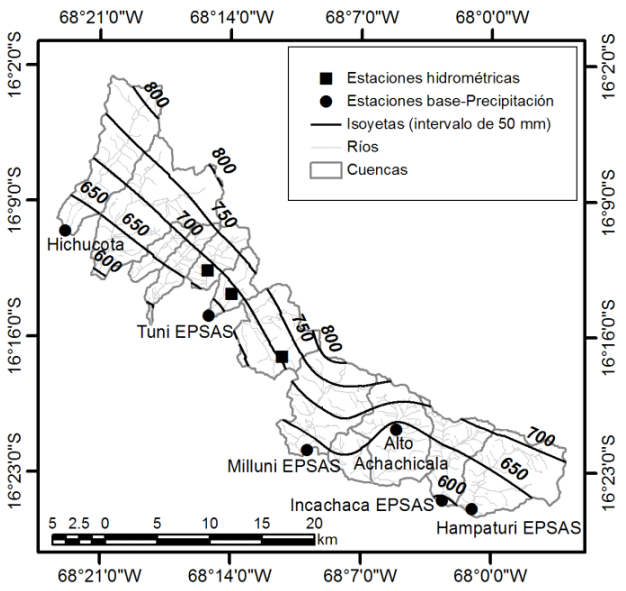


Figura 3. Isoyetas interpoladas para las cuencas de estudio (Fuente: Elaboración propia)

Para delimitar las unidades básicas de modelación, se utilizó un modelo numérico de elevación con resolución espacial de 20 m elaborado con la Carta Nacional escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM-Bolivia); el modelo permitió delimitar las cuencas y realizar una clasificación de bandas de elevación con intervalos iguales de 300 m. La cobertura y uso de la tierra se obtuvo mediante interpretación visual y digital sobre una imagen Landsat TM 5 de fecha septiembre/1994, donde se definieron cinco categorías: glaciares, vegetación dispersa de gramíneas y arbustos, bofedales, cuerpos de agua y aflo-

ramientos rocosos. La intersección de cada banda de elevación con los límites de la cuenca y la cobertura de la tierra, permitió definir las unidades básicas de modelación.

Escenarios de cambio climático

El dominio de la modelación hidrológica es muy pequeño, ya que el área de las cuencas modeladas es menor a 100 km^2. El enfoque utilizado para desarrollar los escenarios de cambio climático fue el uso directo de GCMs, en este caso la probabilidad de condiciones futuras con *Regional Climate-Change Projection from Multi-Model Ensembles (RCPM, http://rcpm.ucar.edu/),* que son resultados de un análisis estadístico de proyecciones de diferentes modelos climáticos, utilizando un modelo estadístico Bayesiano para sintetizar la información de varios GCMs en una función de densidad de probabilidad de cambio en la temperatura y precipitación (Tebaldi et al., 2005).

Primero se realizó un análisis estadístico de la estructura de datos históricos de la estación meteorológica con registro más extenso, que en este caso es la estación San Calixto con datos desde el año 1917 (Figura 4), la cual está ubicada a una altitud de 3.658 msnm. A partir de esto se generó una matriz de transición de dos estados de probabilidad (Tabla 1). Con base en este análisis se realizó la extensión de series de tiempo para las estaciones base usada en WEAP.

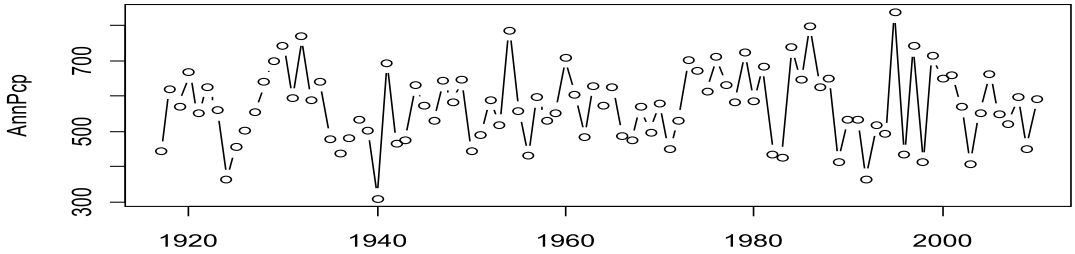


Figura 4. Precipitación histórica de la estación San Calixto (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 1. Matriz de transición de estados de probabilidad en la estación meteorológica San Calixto

AÑO ACTUAL	PROBABILIDAD SIGUIENTE AÑO DEBAJO DE PROMEDIO (1)	PROBABILIDAD SIGUIENTE AÑO ENCIMA DE PROMEDIO (2)
DEBAJO DE PROMEDIO	55%	45%
ENCIMA DE PROMEDIO	43%	56%

Fuente: Elaboración propia

Segundo, se usó el RCPM para la región de interés (Figura 5). Esta es una técnica estadística para calcular los cambios esperados del clima en el futuro para una región determinada sobre la base de datos de observación y los resultados de un conjunto de Modelos Climáticos Globales (GCM) y suposiciones sobre emisiones futuras. Finalmente se aplicaron los cambios esperados del análisis probabilístico del RCPM a las series sintéticas mensuales de precipitación. Se realizó una combinación de gamas de opciones, desde escenarios secos y muy calientes (Figura 6), que en adelante se denominan como pesimistas, hasta escenarios húmedos y calientes (Figura 7), denominados como optimistas de acuerdo con la forma en que estos escenarios podrían beneficiar al sistema al generar mayor disponibilidad de agua.

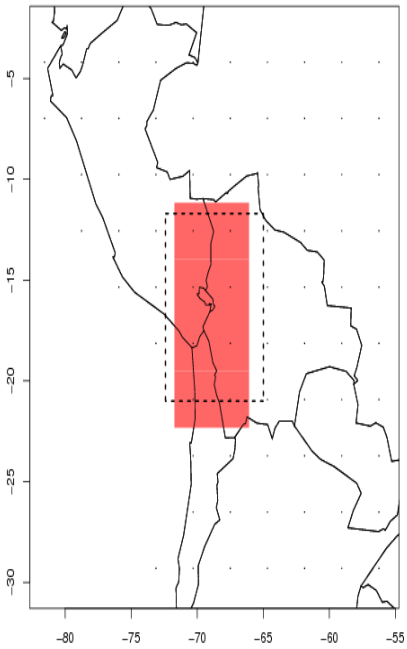


Figura 5. Dominio del análisis en RCPM
(Fuente: Elaboración propia)

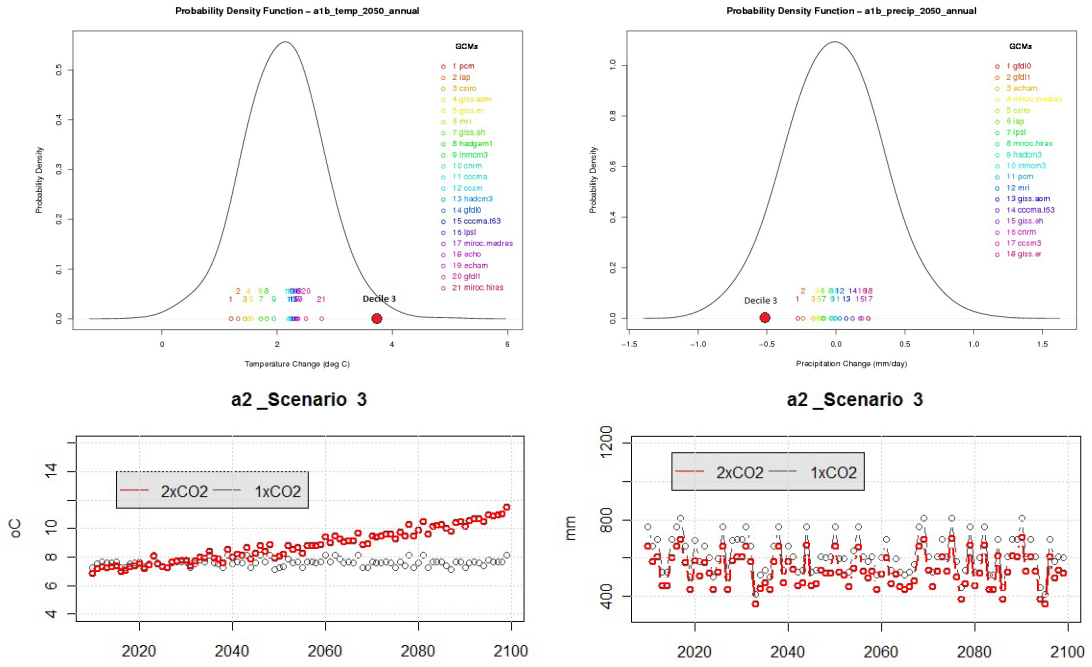


Figura 6. Combinación de escenario seco y muy caliente (Fuente: Elaboración propia)

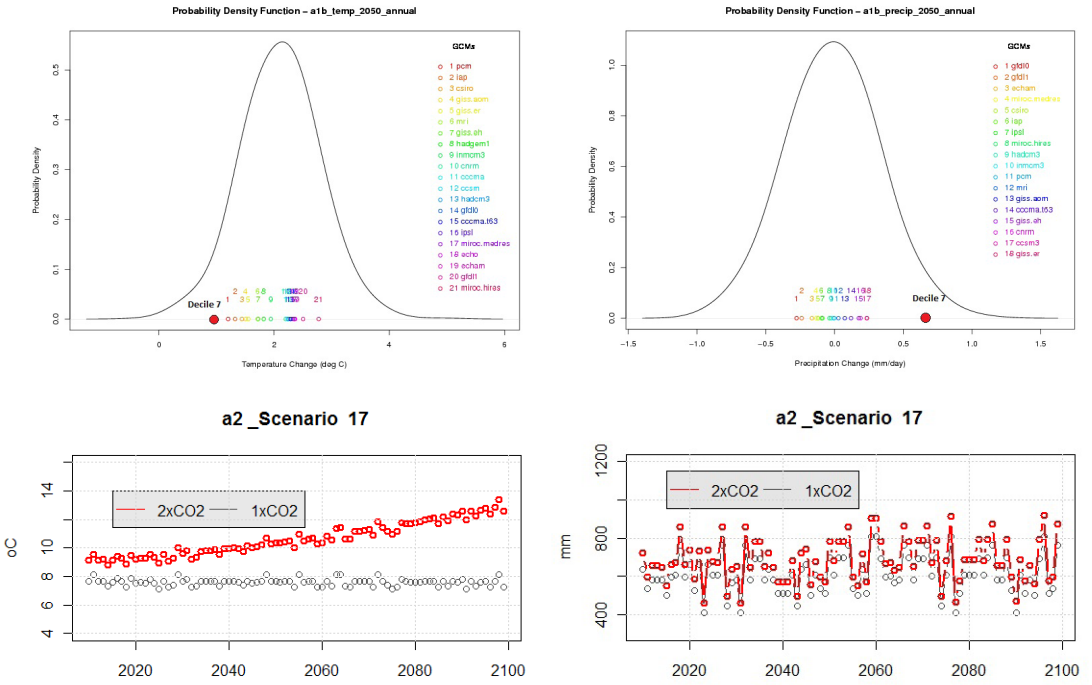


Figura 7. Combinación de escenario húmedo y caliente (Fuente: Elaboración propia)

Se generaron 18 escenarios de temperatura y 18 escenarios de precipitación, de los cuales se seleccionaron seis combinaciones de temperatura y precipitación, excluyendo los más extremos. Con este procedimiento se generaron las proyecciones climáticas para el futuro.

RESULTADOS

Calibración y validación del modelo

La estrategia de calibración para el área de estudio consistió primero en la calibración del modulo glaciar grado-mes para la cuenca glaciar Zongo y segundo la calibración de la precipitación-escorrentía para las cuencas Condoriri, Tuni y Huayna Potosí. La cuenca glaciar Zongo tiene un área de 3.5 km^2 con cobertura glaciar del 65% y el resto conformada por afloramientos rocosos constituidos de granodiorito impermeable, por tanto casi la totalidad de agua de fusión transita por la estación limnimétrica ubicada sobre una altitud de 4830 m (Leonardini, 2010). Para el periodo de tiempo de calibración (2004-2010) los parámetros de calibración obtenidos fueron: T_0 en 0.5 °C, a_{ice} en 350 mm mes^{-1} °C^{-1} y a_{sonw} en 550 mm mes^{-1} °C^{-1}. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utilizó el índice de eficiencia de Nash-

Sutcliffe, que es una medida estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de datos de medición (Nash & Sutcliffe, 1970). Cuando el índice de eficiencia es igual a 1 el ajuste es perfecto entre los datos modelados y observados. El valor de índice de calibración obtenido es 0.6 que corresponde a un nivel adecuado de calibración considerando las limitaciones en datos. Por otro lado, la desviación relativa de los caudales o el sesgo fue estimado en 3.7%, demostrando una adecuada calibración. En la Figura 8 se muestra la distribución mensual de caudales calibrados, donde se evidencia que existe una adecuada representación de los patrones temporales.

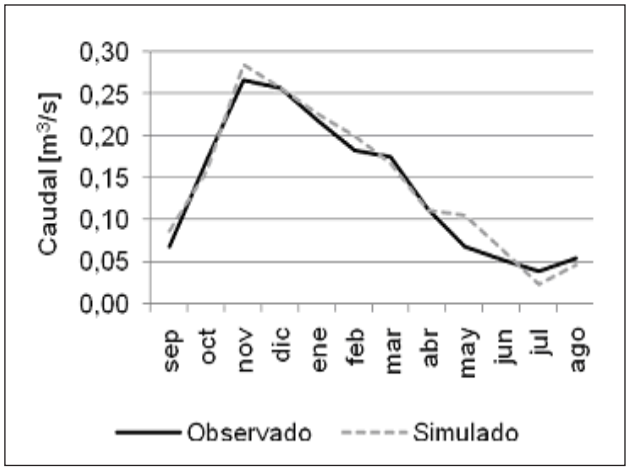


Figura 8. Caudal observado y simulado medio mensual en la cuenca glaciar Zongo durante el periodo 2004-2010 (Fuente: Elaboración propia)

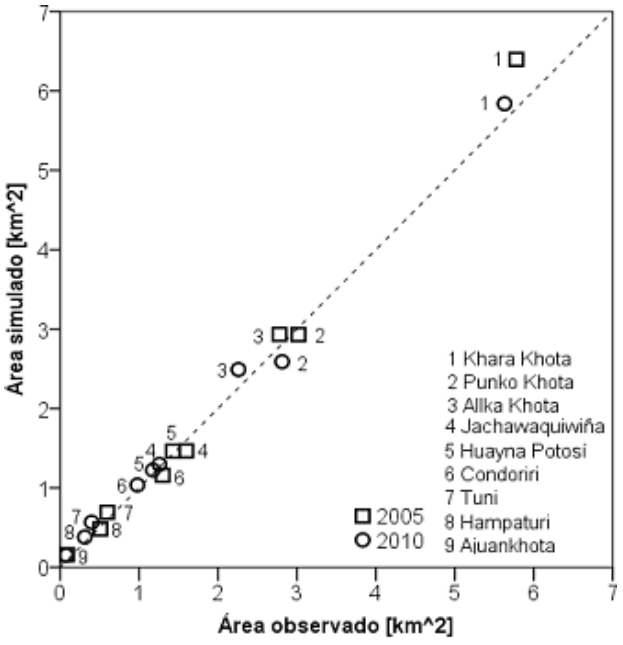


Figura 9. Diagrama de dispersión de áreas glaciares observados y simulados para el año 2005 y 2010 (Fuente: Elaboración propia).

Los parámetros de calibración de Zongo fueron extrapolados a los glaciares donde no se cuenta con datos. Para verificar su representación adecuada el área modelada se comparó con el área digitalizada sobre una imagen del satélite Landsat TM 5. En la Figura 9 se puede observar dicha comparación en un diagrama de dispersión para el año 2005 y 2010, donde los resultados tienden a alinearse a una línea 1:1 indicando una buena correspondencia. Sin embargo, considerando la resolución espacial de la imagen usada que es 30 m, pueden existir errores en el cálculo del área digitalizada u observada. La evolución del área glaciar indica que la cuenca Condoriri ha perdido 36% de su superficie glaciar y la cuenca Tuni el 47% entre 1995 y 2010.

Tabla 2. Parámetro de calibración en las cuencas Condoriri, Tuni y Huayna Potosí.

Parámetro	Roca	Vegetación dispersa	Bofedales
Coeficiente de cultivo, Kc	0.95	0.9	0.9
Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces, Sw [mm]	500	800	1000
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw [mm]	500	500	500
Factor de resistencia a la escorrentía, RRF	5, 1	5, 1	5, 1
Conductividad de zona de raíces, Ks [mm/mes]	400, 50	400, 50	400, 50
Conductividad de zona profunda, Kd [mm/mes]	50	50	50
Dirección preferencial de flujo, f	0.9	0.7	0.3
Z1 [%]	10	10	10
Z2 [%]	30	30	30

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de calibración de precipitación-escorrentía se recomienda primero entender todos los parámetros que intervienen en *Soil Moisture Model* de WEAP y segundo conceptualizar las caracterísitcas hidrológicas particulares de las cuencas asociadas a la cobertura y uso del suelo, así tambien a otras características fisiográficas. En el caso de las cuencas en estudio se realizaron algunos ajustes en la Conductividad en la Zona de Raíces (Ks) y Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF). En el primer caso, Ks, es un parámetro no linear que puede definirse en función de la precipitación ya que en estas cuencas el suelo al inicio del año hidrológico (septiembre)

se encuentra muy seco. Cuando existe precipitación esta no escurre directamente sino que el escurrimiento empieza una vez el suelo está lo suficientemente saturado para liberarlo. Entonces para la calibración de este parámetro se planteó la siguiente hipótesis: menos conductividad en la época seca (50 mm/mes) y mayor conductividad en la húmeda (400 mm/mes). Asimismo para el RRF, cuando el suelo está seco existe baja escorrentía (RRF=5), ya que gran parte de la precipitación se infiltra y en la época húmeda debido a que el suelo se encuentra saturado existe mayor escorrentía (RRF=1). El umbral de precipitación calibrado para realizar estos ajustes en las cuencas fue 100 mm. Los restantes parámetros se pueden observar en la Tabla 2.

Los resultados de la calibración son aceptables. El parámetro de eficiencia Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) en las tres cuencas oscila entre 0.6 y 0.73, pero en Tuni hay una subestimación del 17.57% según la medida del sesgo (Tabla 3). Los parámetros de calibración del fueron extrapolados para las cuencas sin caudales observados bajo los siguientes criterios: las cuencas son de régimen natural, es decir no existe mucha intervención humana y por tanto la cobertura y uso de la tierra es prácticamente similar en todos; están sobre una altitud mayor a 4300 m; tienen características geológicas similares, donde se observan rocas sedimentarias del Silúrico y Ordovícico, batolitos del Triásico y depósitos de morrena del Cuaternario (GEOBOL, 1995); contienen formación de suelos in situ de textura franco arenoso y franco arcillo arenoso. Según los criterios anteriores, se consideró que era posible extrapolar la calibración de las cuencas con información a aquellas cuencas exploradas como nuevas fuentes. Aunque esto puede generar fuentes de incertidumbre en las predicciones, esta incertidumbre no se ignora, sino que se asume de forma que los datos obtenidos constituyen estimados y no datos precisos.

Tabla 3. Índices/métricas de la calibración del modelo hidrológico

Estación hidrométrica	Nash-Sutcliffe	Bias [%]
Tuni	0.73	-17.57
Condoriri	0.60	-0.44
Huayna Potosí	0.65	6.42

Fuente: Elaboración propia

Comparación de caudales modelados por WEAP y AguAAndes

El AguAAndes es un modelo sofisticado de balance hídrico distribuido espacialmente que ha sido desarrollo para cuencas con escases de datos y características muy heterogéneas. Además provee herramientas para el análisis de escenarios de cambio climático y uso de la tierra; asimismo es posible el análisis de opciones de políticas o intervención. El modelo está basado en el modelo hidrológico FIESTA (Mulligan & Burke, 2005; Bruijnzeel et al., 2011) y procesos físicos; además no requiere calibración. Los componentes que utiliza son la distribución de la precipitación a través de la interacción con el viento, radiación solar, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y cubierta vegetal *(http://www.policysupport.org/aguaandes).* El modelo opera sobre una plataforma WEB y a una resolución espacial de 1 km^2 o 1 ha. Cuando se procesa para alguna región de la Cordillera de Los Andes el sistema se denomina AguAAndes, ahora si se aplica en otras partes del mundo se conoce como WaterWorld (Mulligan, 2012).

Los caudales modelados por AguAAndes corresponden al periodo 1950-2000, mientras que la modelación en WEAP se realizó para el periodo 1995-2010. Los resultados para algunas cuencas estudiadas podemos ver en la Tabla 4. En el caso de cuencas con datos de caudales observados (El Alto) los resultados de comparación son relativamente aceptables, al igual que en las cuencas potenciales; pero en las cuencas de suministro de La Paz AguAAndes sobreestima los caudales. Sin embargo no es correcto dicha comparación, ya que la oferta calculada corresponde a distintos periodos de tiempo. A objeto de validar se efectuó la prueba de U Mann Whitney, que es un test no paramétrico que permite comparar la distribución de dos poblaciones.

El test considera que la hipótesis alterna (H_a) establece que las distribuciones son distintas, mientras que la hipótesis nula (H_0) que las poblaciones tienen la misma distribución. En base a los resultados mostrados en la Tabla 5, el valor U adoptado es 44.5 el cual es más grande que el nivel de significancia por tanto se rechaza la H_a y se acepta la H_0, es decir que las poblaciones provienen de distribuciones idénticas. Esta técnica de comparación puede ser una forma de validación de la extrapolación de los parámetros de calibración.

Tabla 4: Comparación entre caudales modelados por WEAP y AguAAndes

Fuente	Ciudad	Cuenca	AguAAndes [m^3/s]	WEAP [m^3/s]
Actual	El Alto	Tuni	0.26	0.29
		Condoriri	0.33	0.36
		Huayna Potosí	0.73	0.70
	La Paz	Milluni	0.93	0.74
		Chacaltaya	0.21	0.12
		Kaluyo	0.95	0.43
		Incachaca	0.72	0.32
Potencial	El Alto	Khara Khota	1.01	1.10
		Taypichaca	1.37	1.33
		Jachawaquiwiña	0.30	0.33

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Resultados del Test U Mann Whitney

Modelo	N	R	U	α=0.05
AguAAndes	10	110.5	44.5	Se acepta H_0
WEAP	10	99.5	55.5	Se rechaza H_a

N: Tamaño de la muestra
R: Suma de rangos
U: Valor de Mann Whitney

Oferta y demanda de agua

Para la modelación de la demanda se utilizó la base de datos de EPSAS que incluye: población, consumo per cápita y volúmenes de embalses observados. Los datos finales de entrada al modelo se pueden observar en la Tabla 6. La oferta de agua determinada con el modelo WEAP para las cuencas en estudio para el periodo 1995-2010 se muestra en la Tabla 7. En el caso de las cuencas de suministro El Alto la oferta oscila de 0.29 a 0.70 m³/s donde el aporte glaciar representa entre 20 a 28%. En la época de lluvia el caudal máximo medio está entre 0.77 y 1.83 m³/s; mientras en la época seca 0.04 y 0.11 m³/s (Figura 10). El caudal de ingreso al embalse Tuni en el año 2010 fue de 1.3 m³/s.

Tabla 6: Datos para modelación de la demanda de los sistemas de agua de la Paz y El Alto

Sistema	Ciudad	Población [hab]	Consumo per cápita [m³/año]	Perdidas [%]
Achachicala	La Paz	195,000	81	33
Pampahasi		300,000	52	33
El Alto	El Alto	1'150,000	19	38

Fuente: en base a base de datos EPSAS

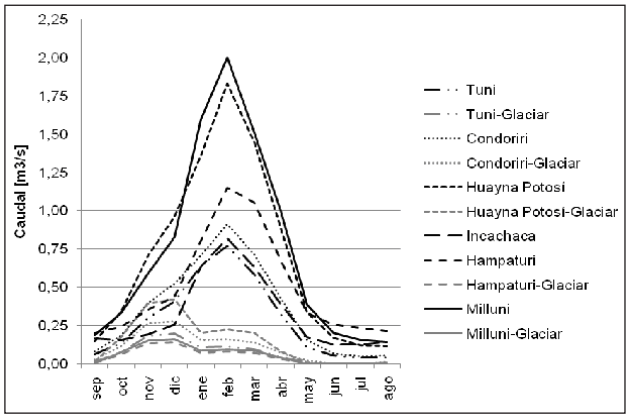


Figura 10. Caudal de aporte de las cuencas de suministro de agua de las ciudades de La Paz y El Alto (Fuente: Elaboración propia)

La demanda de agua modelada para el sistema El Alto en el año 2010 fue del 1.11 m³/s, del cual el 38% corresponde a pérdidas en el sistema. Si bien la oferta en las cuencas es mayor que la demanda, pero existen pérdidas por evaporación en los embalses. Además la capacidad máxima de la infraestructura de conducción del embalse hasta la planta de tratamiento es de 0.968 m³/s. Es así que la cobertura modelada es solo del 87%. El sistema está al límite de su capacidad de producción, por esta razón se extrae agua del embalse Milluni (sistema Achachicala) en un total de 0.055 m³/s y ésta se inyecta al sistema El Alto.

Considerando la demanda actual, es necesario y urgente la inversión en nueva infraestructura hidráulica en otras cuencas planteadas en el Plan Maestro de Agua Potable del año 1994, como Khara Khota y Taypichaca, donde el caudal estimado fue de 1.10 y 1.33 m³/s respectivamente. En estas cuencas la presencia de glaciares es mucho más importante en términos de área, y por tanto el aporte glaciar esta en el orden del 49 y 43% respectivamente.

En las cuencas de suministro del sistema Pampahasi, Hampaturi e Incachaca, el caudal es de 0.49 y 0.32 m³/s respectivamente, haciendo un total de 0.81 m³/s (Tabla 7). El aporte glaciar modelado en la cuenca Hampaturi es del orden del 10%. La demanda modelada para el año 2010 fue de 0.74 m³/s. La cobertura modelada considerando todas las pérdidas en el sistema es del 100%.

En el sistema Achachicala la oferta de la cuenca Milluni es de 0.74 m³/s. La demanda calculada para el 2010 es 0.75 m³/s (Tabla 7). Además existe una aducción en la cuenca baja del rio Kaluyo (Choqueyapu) con una capacidad máxima de 0.2 m³/s cerca a la planta de tratamiento, es así que se logra una cobertura del 100%.

Tabla 7: Oferta de agua en las cuencas de suministro de agua actual y potencial de las ciudades La Paz y El Alto para el periodo 1995-2010.

Sistema	Abastece la ciudad de	Cuenca	Caudal total [m³/s]	Aporte Glaciar [m³/s]
El Alto	El Alto	Tuni	0.29	0.07 (24%)
		Condoriri	0.36	0.10 (28%)
		Huayna Potosí	0.70	0.14 (20%)
Achachicala	La Paz	Milluni	0.74	0.06 (8%)
Pampahasi		Incachaca	0.32	
		Hampaturi	0.49	0.05 (10%)
Nuevas cuencas	El Alto	Khara Khota	1.10	0.54 (49%)
		Taypichaca	1.33	0.57 (43%)
		Janchallani	0.14	
		Jachawaquiwiña	0.33	0.14 (42 %)

Fuente: Elaboración propia

Impacto del cambio climático en el abastecimiento de agua

El análisis del impacto del cambio climático en el abastecimiento de la demanda se realizó para un periodo de tiempo a mediano plazo 2011-2026 y a largo plazo 2035-2050. Los cambios de precipitación y temperatura son variables para cada estación base usada en WEAP. En la Tabla 8 se muestran los cambios esperados en el clima respecto al periodo histórico 1995-2010, en el caso de la temperatura a mediano plazo se espera un incremento hasta 1.1 °C y a largo plazo 1.8 °C. Respecto a la precipitación, en la estación base Tuni se esperan reducciones hasta 11.4% y 8.7% para los respecticos periodos de análisis.

Tabla 8: Cambios de precipitación (estación base Tuni) y temperatura a mediano y largo plazo.

Clima	Periodo			
	2011-2026		2035-2050	
	P [%]	T[°C]	P [%]	T [°C]
1	+0.8	+0.0	+6.3	+0.8
2	+1.1	+0.4	+8.7	+1.1
3	-4.9	+0.5	+3.1	+1.2
4	-5.5	+0.6	-0.4	+1.4
5	-4.8	+0.8	-8.1	+1.7
6	-11.4	+1.1	-8.7	+1.8

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la demanda de agua se realizaron proyecciones de población en base a los datos históricos y tendencias del Instituto Nacional de Estadística (INE). Donde para El Alto se estimó una población de 1'600.000, para Pampahasi 360.000 y para Achachicala 197.000 hasta el año 2050. Respecto al consumo per cápita y pérdidas se consideraron los mismos datos del periodo 1995-2010. Los cambios probables en la oferta de agua por el cambio climático en las cuencas de suministro de agua se muestran en la Tabla 9 y Tabla 10.

Los resultados indican que las reducciones de caudales son más críticos en las cuencas de suministro del sistema El Alto. Estos cambios marcados están directamente relacionados con el aporte de los glaciares, ya que las cuencas son pequeñas en comparación de otras cuencas de suministro como Incachaca, Hampaturi y Milluni. Para el periodo histórico según la modelación hubo un retroceso acelerado especialmente en las bandas de altitud 4700-5000 m y 5000-5300 m, según la reclasificación de la altitud para la modelación. Asimismo el año hidrológico 1997-1998 fueron los más cálidos de los últimos seis décadas (Vuille & Bradley, 2000). Considerando que el periodo histórico de modelación es simplemente dieciséis años, el aporte glaciar es mayor en comparación a los aportes modelados hacia el futuro, y por ende se dan cambios notables en los caudales.

En la Figura 11 se muestra la evolución del retroceso glaciar de la cuenca Tuni bajo escenarios de cambio climático, donde los resultados indican que los glaciares en dicha cuenca desaparecerían en los próximos 30 años. Esto definitivamente podría tener implicaciones en el abastecimiento de agua en el sistema El Alto, donde la demanda modelada hasta el año 2026 fue en 1.29 m^3/s y hasta el año 2050 en 1.55 m^3/s. Con la actual infraestructura la cobertura de la demanda para el escenario de clima pesimista a mediano y largo plazo seria del 71% y 51% respectivamente; y para el caso del clima futuro optimista 75% y 62% para ambos casos.

Tabla 9. Cambios probables en la oferta de agua para el periodo 2011-2026 respecto al periodo de referencia 1995-2010.

Cuenca	Escenario de Cambio Climático					
	1	2	3	4	5	6
Tuni	-21%	-17%	-24%	-24%	-21%	-28%
Condoriri	-19%	-14%	-19%	-19%	-17%	-22%
Huayna Potosi	-14%	-9%	-14%	-16%	-13%	-19%
Milluni	+5%	0%	-3%	-14%	-12%	-14%
Incachaca	+3%	-6%	-9%	-16%	-16%	-28%
Hampaturi	+6%	0%	-6%	-12%	-16%	-22%
Khara Khota	-28%	-15%	-15%	-13%	-7%	-7%
Taypichaca	-27%	-17%	-17%	-17%	-13%	-14%

Fuente: Elaboración propia

Nota: la descripción de los seis escenarios de clima se puede ver en la Tabla 8.

Tabla 10. Cambios probables en la oferta de agua para el periodo 2035-2050 respecto al periodo de referencia 1995-2010**.**

Cuenca	Escenario de Cambio Climático					
	1	2	3	4	5	6
Tuni	-14%	-14%	-21%	-24%	-38%	-31%
Condoriri	-14%	-17%	-22%	-25%	-36%	-33%
Huayna Potosi	-6%	-6%	-14%	-17%	-30%	-27%
Milluni	+9%	+24%	11%	-14%	-15%	-15%
Incachaca	+9%	+3%	+0%	-13%	-25%	-28%
Hampaturi	+8%	+8%	+6%	-10%	-20%	-27%
Khara Khota	-11%	-18%	-22%	-28%	-35%	-33%
Taypichaca	-14%	-21%	-25%	-32%	-38%	-35%

Fuente: Elaboración propia

Nota: la descripción de los seis escenarios de clima se puede ver en la Tabla 8.

Con base en la demanda modelada tanto para los sistemas de Pampahasi y Achachicala y los cambios esperados en los caudales de las cuencas, la cober-

tura de la demanda para el escenario de clima futuro pesimista a mediano plazo sería de 97% y 78% para ambos casos. A largo plazo las coberturas se reducirían a 94% y 68% respectivamente.

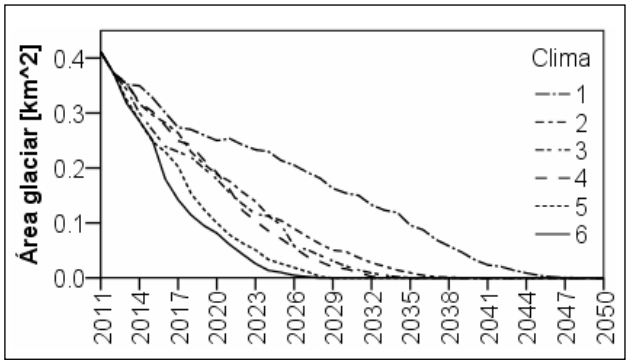


Figura 11. Retroceso glaciar en la cuenca Tuni para diferentes escenarios de clima futuro (Fuente: Elaboración propia)
Nota: la descripción de los seis escenarios de clima se puede ver en la Tabla 8

CONCLUSIONES

En esta investigación se desarrolló una herramienta que permite la modelación de los recursos hídricos incluyendo incertidumbres como cambio climático que puede ser útil en la planeación. Sin embargo, se deben hacer algunas consideraciones. El modulo glaciar usado es simple debido a las limitaciones en datos, sería adecuado usar un modelo basado en el balance energético.

La modelación hidrológica en zonas de montaña como el área estudiada es bastante compleja, debido a la escasez de datos y a la alta variabilidad climática. En las cuencas de suministro de La Paz y El Alto, existen escasos datos climáticos, y en el caso de los glaciares fue necesario extrapolar datos del glaciar Zongo. Con estas consideraciones los resultados presentados de los aportes glaciares deben ser usados como referencia y no como valores exactos. En el caso de la extrapolación de los parámetros de calibración del modelo hidrológico a las posibles cuencas de suministro, fue validado con el balance hídrico en AguAAndes. Los resultados modelados tanto en WEAP como AguAAndes son aceptables. De esta manera esta herramienta puede ser útil en cuencas donde no se cuenta con datos suficientes.

El sistema El Alto en el futuro podría sufrir serios problemas en el abastecimiento de debido al incremento de la demanda y la reducción de la oferta de agua por los cambios esperados en el clima futuro. Asimismo, el sistema Pampahasi también podría presentar problemas pero menos preocupantes que en el caso de El Alto. Finalmente en el caso del sistema Achachicala, si bien las cuencas podrían sufrir cambios en la disponibilidad de agua ésta no presentaría problemas en la cobertura de la demanda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AguAAndes. http://www.policysupport.org/aguaandes

Bahr, D.B., M.F. Meier and S.D. Peckham. 1997. The physical basis for glacier volume-area scaling. Journal of Geophysical Research 102 (B9): 20355–20362.

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu & J.P. Palutikof, Eds. 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

Bruijnzeel, L. A., M. Mulligan & F.S.Scatena. 2005. Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. Hydrological Processes 25: 465–498.

Brunet-Moret, Y.1979. Homogénéisation des precipitations. Cahier ORSTOM, Série Hydrologie 16: 3–4

Centro de Cambio Global, Universidad de Chile & Stockholm Environment Institute. 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos Con El Modelo WEAP. Santiago, Chile, y Somerville, MA, EEUU. http://weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf

Condom, T., M. Escobar, D. Purkey, J.C. Pouget, W. Suarez, C. Ramos, J. Apaestegui, A. Tacsi & J. Gomez. (2012): Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. Water International 37 (4): 442-459

Francou, B., M. Vuille, P. Wagnon, J. Mendoza & J.E. Sicart. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 108(D5). DOI:10.1029/2002JD002959.

GEOBOL. 1995. Carta Geologica Hoja 5945 - Milluni. La Paz, Bolivia.

Hiez, G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. Cahier ORTSTOM, Série Hydrologie 14: 129–172.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, y C. E. Hanson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC. 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Leonardini G. 2010. Análisis mensual de los balances de masa glaciológico e hidrológico del glaciar tropical Zongo (Bolivia). Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.

Mehta, V., M. Escobar & D. Decondapa. 2010. UNDERSTANDING GLACIATED HIMALAYAN HEADWATERS - An Integrated Climate-Energy-Water Assessment Framework. White Paper.

Molina, F. & R. Pereira. 2005. Crecimiento demográfico y el problema del agua en El Alto. La Prensa. 310 ed. Bolivia.

Mulligan, M. 2012. WaterWorld: a self-parameterising, physically-based model for application in data-poor but problem-rich environments globally. Hydrology Research, in press. DOI: 10.2166/nh.2012.217

Mulligan, M. & S. M. Burke. 2005. FIESTA: Cloud water interception for the Enhancement of Streamflow in Tropical Areas. Report to UK DfID, 174 pp.

Nash, J. E. & J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology 10(3): 282–90. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Pouget, J. C. 2011. Propuesta del modelo Ice KISS como un componente de un sistema de apoyo a la planificación de los recursos hídricos. Quito-Ecuador.

Ramírez, R., E. 2008. Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. Revista Virtual REDESMA 2 (3)Ramirez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloitres, R. Guérin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud & E. Jordan. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16° S). Journal of Glaciology 47(157): 187–94. DOI:10.3189/172756501781832214.

Soruco, A., C. Vincent, B. Francou & J.F. Gonzalez. 2009. Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. Geophysical Research Letters 36: L03502. DOI:10.1029/2008GL036238

Tebaldi, C., R. Smith, D. Nychka & L. Mearns. 2005. Quantifying Uncertainty in Projections of Regional Climate Change: A Bayesian Approach to the Analysis of Multimodel Ensembles. *J. Climate* **18**: 1524–1540. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3363.1

Vauchel, P., 2005. HYDRACCESS: Software de procesamiento de datos hidro-meteorologico. Disponible en: http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels.htm.

Vuille, M. & R. Bradley. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. Geophysical Research Letters 27 (23): 3885-3888.

Yates, D., J. Sieber, D. Purkey & A. Huber-Lee. 2005a. WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Water International 30 (4): 487–500. DOI:10.1080/02508060508691893.

Yates, D., D. Purkey, J. Sieber, A. Huber-Lee & H. Galbraith. 2005b. WEAP 21--A Demand, Priority, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 2, Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation. Water International 30 (4): 501–2.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación forma parte del apoyo técnico al “Programa de Resiliencia Climática para los Sistemas de Agua y Saneamiento de las Áreas Metropolitanas de La Paz y El Alto” (PPCR/SPCR). Agradecemos el apoyo del personal del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en Washington y Bolivia, especialmente a Alfred Grunwaldt, Alejandro Deeb, Ana Iju, Martin Kerres, y Prem Jai Vidaurre de la Riva.

CHARACTERIZATION OF HARDNESS IN THE GROUNDWATER OF PORT-AU-PRINCE. AN OVERVIEW ON THE HEALTH SIGNIFICANCE OF MAGNESIUM IN THE DRINKING WATER

CARACTERIZACIÓN DE LA DUREZA EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE PUERTO PRINCIPE. UNA VISIÓN GENERAL SOBRE LA IMPORTANCIA PARA LA SALUD DEL MAGNESIO EN EL AGUA POTABLE.

Evens Emmanuel[1,2,3], Yanick Simon[1,2], Osnick Joseph[3]

Abstract

Water hardness is basically the sum of the concentrations of dissolved polyvalent metal ions which Ca^{2+} and Mg^{2+} are predominant. In recent years it has become an important public health issue. Indeed, it has been reported in the literature a relationship between cardiovascular disease mortality and water hardness used for human consumption. It seems that total hardness of water concentration greater than 200 mg/L with a magnesium concentration less than 7 mg/L can cause adverse effects on human health.

In Haiti, where more than 60% of the territory's geology is dominated by limestone, water resources are known to be very hard. Studies of the sources used to supply the population of the metropolitan area of Port-au-Prince (MAPP), the largest urban area in the country, showed a total hardness greater than 200 mg/L, with magnesium concentration less than 7 mg/L. Otherwise, cardiovascular diseases are the 7th cause of death and represent 3% of total deaths. In the perspective to evaluate the health risk associated with low magnesium concentration in the water used for human consumption, it seems appropriate to proceed with the characterization of the main components of the hardness into groundwater of the MAPP. The aim of this study was: (i) to review the chemistry and toxicology of Ca^{2+} and Mg^{2+} in order (ii) to characterize hardness, with a specific emphasis on Mg concentration, in Port-au-Prince groundwater. Mg^{2+} concentrations ranging from 5.58 to 6.9 mg/L were measured in a private borehole. These results should be confirmed by studies involving a larger sample size during rainy and dry seasons.

Keywords*:* water hardness, geology and hydrogeology of MAPP, groundwater, medical geology, cardiovascular diseases, health hazards.

Resumen

La dureza del agua es básicamente la suma de las concentraciones de iones metálicos polivalentes disueltos de los cuales Ca2+ y Mg2+ son predominantes. En los últimos años esto se ha convertido en un problema de salud pública importante. De hecho, se ha registrado en la literatura una relación entre la mortalidad por causa de enfermedades cardiovasculares y la dureza del agua utilizada para el consumo humano. Aparentemente una dureza total superior a 200 mg/L, con una concentración de magnesio menor a 7 mg/L puede causar efectos adversos para la salud humana.

En Haití, donde más del 60% de la geología del territorio está dominada por piedra caliza, los recursos hídricos son conocidos por ser muy duros. Los estudios de las fuentes de abastecimiento a la población de la zona metropolitana de Puerto Principe (MAPP), el área urbana más grande del país, mostraron una dureza total superior a 200 mg/L, con una concentración de magnesio menor a 7 mg/L, sin embargo, las enfermedades cardiovasculares son la séptima causa de muerte y representan el 3% de las muertes totales. En la perspectiva de evaluar el riesgo para la salud asociado a una baja concentración de magnesio en el agua utilizada para el consumo humano, parece conveniente proceder a la caracterización de los principales componentes de la dureza de las aguas subterráneas de la MAPP. El objetivo de este estudio fue: (i) revisar la química y toxicología de Ca2+ y Mg2+ con el fin de (ii) caracterizar la dureza, con un énfasis específico en la concentración de Mg en el agua subterránea de Puerto Principe. Se midieron en un pozo privado concentraciones de Mg2+ en el rango de 5,58 hasta 6,9 mg/L. Estos resultados deben ser confirmados por estudios con una muestra mayor, durante las estaciones lluviosa y seca.

Palabras clave: la dureza del agua, geología y hidrogeología de la MAPP, agua subterránea, geología médica, enfermedades cardiovasculares, riesgos para la salud.

1 Laboratoire Santé-Environnement, Université Quisqueya, 218 Avenue Jean Paul II, Haut de Turgeau, Port-au-Prince, Haïti. Tel: (509) 3423 4269 / (509) 3718 4833; Email: evens.emmanuel@gmail.com

2 Haiti Chapter of International Medical Geology Association, Université Quisqueya, 218 Avenue Jean Paul II, Haut de Turgeau, Port-au-Prince, Haïti.

3 Laboratoire de Qualité de l'Eau et de l'Environnement, Université Quisqueya, 218 Avenue Jean Paul II, Haut de Turgeau, Port-au-Prince, Haïti.

Recibido: 30/06/2013
Aceptado: 12/02/2014

1. INTRODUCTION

Hardness is the traditional measure of the capacity of water to react with soap and describes the ability of water to bind soap to form lather, which is a chemical reaction detrimental to the washing process (Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005). Water hardness water results from the contact of groundwater with rock formations. Hardness is due to the presence of polyvalent metallic ions, predominantly Ca^{2+} and Mg^{2+} (Desjardin, 1988). The sources of the metallic ions are typically sedimentary rocks, and the most common are limestone ($CaCO_3$) and dolomite ($CaMg(CO_3)_2$).

Hardness has been deemed safe for human health, until Kobayaski (1957) showed a relationship between water hardness and the incidence of vascular diseases. Other studies reported the existence of a relationship between cardiovascular disease mortality and water hardness (Schroeder, 1960; Sharret, 1979; Masironi et shaper, 1981). Hewitt and Neri (1980) noted more than 100 studies on water hardness in association with cardiovascular diseases. Miyake and Iki (2004) observed a lack of association between water hardness and coronary heart diseases (CHD) mortality in Japan. Nonetheless, a large number of studies covering many countries suggest such a correlation and geochemically it is worthy of serious study (Dissanayake and Chandrajith, 2009). Based on available information in the literature on the association of water hardness and the incidence of cardiovascular diseases (CVD), Eisenberg (1992) considered that Mg seems to be the basic element. Indeed, very hard natural water with $CaCO_3$ concentration higher than 200 mg/L with a magnesium concentration lower than 7 mg/L may affect various organs including the cardiovascular physiology (Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005).

Hardness is normally expressed as the total concentration of calcium and magnesium ions in water units of mg/L as equivalent $CaCO_3$ (Desjardin, 1988; Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005; Dissanayake and Chandrajith, 2009). Ca and Mg are present as simple ions Ca^{2+} and Mg^{2+} with the Ca levels varying from tens to hundred of mg/L and the Mg concentrations varying from units of tens of mg/L (Dissanayake and Chandrajith, 2009). Magnesium is significantly less abundant than calcium in rocks and in most natural waters. In addition, magnesium concentrations are much lower in the water than calcium. They are generally less than 50 mg/L, although values higher or equal to 100 mg/L are stored particularly in cold climates (Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005).

In Haiti, where more than 60% of the geology is dominated by limestone, water resources are known to be very hard. Studies on the spring waters used to supply a part of the population of the Metropolitan Area of Port-au-Prince (MAPP), the most important urban area of the country, showed a total hardness greater than 200 mg/L, with magnesium concentration less than 7 mg/L (TRACTEBEL, 1998). Otherwise, cardiovascular diseases are the 7th cause of death and represent 3% of total deaths in the MAPP (MSPP, 2003). In the MAPP, groundwater resources are largely used to supply in drinking water to the population (Emmanuel, 2004). The aim of this study was: (i) to review the chemistry and toxicology of Ca^{2+} and Mg^{2+} in order (ii) to characterize hardness, with a specific emphasis on Mg concentration, in Port-au-Prince groundwater.

2. CHEMISTRY AND TOXICOLOGY OF CA^{2+} AND MG^{2+}

2.1. Water Hardness

Water hardness has been defined in the literature in a variety of ways with multiple units being used to express it, such as German, French and English degrees, equivalent $CaCO_3$ and CaO in mg/L. Water hardness is not caused by a single substance but by a variety of dissolved polyvalent metallic ion – predominantly Ca^{2+} and Mg^{2+} - although other ions, for example, aluminium, barium, iron, manganese, strontium, and zinc also contribute (Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005).

Hardness (in mg equivalent $CaCO_3$/L) can be determined by substituting the concentration of calcium and magnesium, expressed in mg/L, in the following equation (Eaton et al, 1995):

$$\text{Total hardness} = 2.497\,(Ca^{2+}, \text{mg/L}) + 4.118\,(Mg^{2+}, \text{mg/L}) \quad \text{Eq.1}$$

Each concentration is multiplied by the ratio of the formula weight of $CaCO_3$ to the atomic weight of the ion; hence, the factors 2.497 and 4.118 are included in the hardness relation (Freeze et Cherry, 1979). Table 1 summarizes the general guidelines for classification of water hardness (INERIS, 2004).

Table 1. General guidelines for classification of water hardness (INERIS, 2004)

Hardness in mg/L $CaCO_3$	Degree of hardness
0 – 30	Very soft
31 – 60	soft
61 – 120	Moderately soft/ moderately hard
121 – 180	Hard
>180	Very hard

2.2. Physical and chemical properties of Ca^{2+} and Mg^{2+}

Magnesium and calcium are silvery gray alkaline earth metals which are very abundant in the earth's crust (Petit, 1998 ; Fridli, 2002). Table 2 shows certain physical and chemical properties of Ca^{2+} and Mg^{2+} (Fridli, 2002).

Table 2. Physical and chemical properties of Ca and Mg (Cardarelli, 2008 ; Ropp, 2013)

Elements	S[a]	CAS#	Z[b]	A[b]	Density	Electronic configuration	MP[c]	BP[c]	Isotopes
				g/mol	[Kg.m^{-3}]		[0C]	[0C]	
Magnesium	Mg	7 439-95-4	12	24.305	1738	[Ne] 3S^2	649	1090	3
Calcium	Ca	7 440-70-2	20	40.078	1550	[Ar] 4S^2	842	1484	6

[a]Symbol, [2]Atomic number and atomic weight, [3]Melting points and boiling points at atmospheric pressure

2.3. Toxicology of Ca^{2+} and Mg^{2+}

Calcium and magnesium are essential for the human body. They contribute to the formation and solidification of bones and teeth and play a role in the decrease of neuromuscular excitability, myocardial system, heart and muscle contractility, intracellular information, transmission and blood contractility (Baker et al., 2002; Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005; Dissanayake and Chandrajith, 2009). They also play a major role in the metabolism of almost all cells of the body and interacts with a large number of nutrients (Campbell, 1990; Altura et Altura, 1996; Bootman et al., 2001).

In the cardiovascular system, magnesium is the candidate element. It plays an important role as a cofactor and activator of more than 300 enzymatic reactions including glycolysis, ATP metabolism, transport of elements such as Na, K and Ca through membranes, synthesis of proteins and nucleic acids, neuromuscular excitability and muscle contraction (Kožíšek, 2003). That can have hand in various mechanism where the main is the calcium antagonist effect which can be direct or indirect (Berthelot, 2003).

Magnesium and calcium have a cardio-protective effect (WHO, 2005). However, the magnesium's role is predominant. Without optimal amounts of magnesium, heart muscle cells lose the ability to produce the energy they need to contract (Seeling et Rosanoff, 2003). In extracellular level, magnesium is required to maintain the efflux of calcium from the endoplasmic reticulum and comes into competition at the sites of calciproteins (troponine C,…, calmoduline) which participate in the contractile mechanism (Berthelot, 2003). In extracellular level, magnesium blocks the outward passage of potassium and calcium through the cell membrane and by activating the enzyme Na/K-ATPase and Ca-ATPase (Swaminathan, 2003; Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005).

The presence of increased amounts of calcium in the heart cells is an early sign of damage that develops in magnesium deficient animals even before the cells break down, or become necrotic. These cellular modifications can lead to cardiomiopathy (damaged heart muscle), ventricular arrhythmia which can result to heart failure. (Berthelot, 2003; Seeling et Rosanoff, 2003).

The magnesium has been known for its vasodilator power. It acts as a natural calcium antagonist by competing for calcium binding sites in the vascular smooth muscle and thus reducing the constrictive effect of calcium in the blood vessels (Reinhardt, 1981). His increasing opposes the effects of vasoconstrictors agents and potentiates the action of vasodilators agents (Berthelot, 2003). Indeed, the normal constriction and dilatation of all arteries are influenced by hormones (angiotensin, serotonin, acetylcholine) the secretion of which is controlled by the amount of magnesium present (Seeling et Rosanoff, 2003; Rubenowitz-Lundin et Hiscock, 2005). Thereby, magnesium's role in keeping the endothelium normal is important in preventing angina and also in protecting against developing high blood pressure (Seeling et Rosanoff, 2003).

The calcium has a vasoconstrictor action and protects also against developing high blood pressure (Dietary Reference Intakes). Metanalysis comprising nearly 40,000 people has shown that a calcium intake lowered both systolic and diastolic blood pressure (Cappucio et al, 1995; Rubenowitz-Lundin et Hiscock, 2005). Many mechanisms may be the cause of this hypothesis. The one of them is that hypocalcemia inhibits Ca-ATpase activity, which leads to an increase in intracellular calcium and contraction of vascular smooth muscles (Mc Carron, 1985; Rubenowitz-Lundin et Hiscock, 2005). In addition, Dietary calcium suppresses the parathyroid hormone in hypertensive population which causes the blood pression to decrease (Jhonson et al al., 1985; Rubenowitz-Lundin et Hiscock, 2005).

Magnesium and calcium are necessary to keep the appropriate balance in cardiovascular system. A modification (deficiency/toxicity) of the concentration of one of them in intracellular and/or extracellular level have important effect on cardiovascular system (cardiac excitability and vascular tone, contractility and reactivity) and can lead to high blood pressure, cardiac arrhythmia, acute myocardial infarction. That can increase the cardiovascular morbidity and mortality.

In the human body, the toxicity of magnesium may occur at a magnesemia level greater than 1.2 mmol/L (Ismail et al., 2013). Regarding calcium, the serum calcium level should be maintained in a very narrow

way between values of 2.2 and 2.6 mmol/L (Covili et Jacob, 2001). Above this concentration, there could be several adverse effects in which three effects are biologically important and widely studied. It is the nephrolithiasis, the syndrome of hypercalcemia and renal insufficiency with or without alkalosis and the interaction of calcium with other essential minerals (Carroll et Schade, 2003 ; Crown et al, 2009).

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Presentation of study area

To characterize total hardness, and particularly Mg concentration, in Port-au-Prince groundwater (Fig. 1), a borehole from a private drinking water supply network (DWS) was selected in the Cul-de-Sac Plain (north of Port-au-Prince) as the experimental site. The borehole supplies water to a population of 4000 inhabitants including 1600 infants less than 10 years of age. The geology and hydrogeology of the region in which the borehole is located are dominated by a karstic aquifer (Butterlin, 1960; Simonot, 1982; PNUD, 1991). The rainy periods occur in April, May, June and August, September, October and the dry season from December to March (Simonot, 1982).

Wastewaters (domestic and industrial) generated by this urban area are most often discharged into a drainage canal or managed by individual drainage systems. In the Cul-de-Sac plain, two main processes governed the sanitation systems: (i) the pit latrines for low income families, and (ii) for the middle and high income families, individual drainage systems with septic tanks. In the latter, undergo primary treatment that consists in separating large solid materials. The effluents of these tanks are discharged directly into a diffusion well embedded in a matrix consisting of a saturated area and a non saturated area. The groundwater resources are used for drinking water. This aquifer provides more than 50% of the drinking water supply to the population of the Port-au-Prince Urban Community (PPUC) i.e. 3 million people (Emmanuel et al., 2004).

Groundwater resources of Port-au-Prince are vulnerable to contamination related to polluted water infiltration such as leachates, cesspools and septic tanks, stormwater runoff, waste oil discharging, over-irrigation and industrial discharging (Fifi et al., 2010). These sources of groundwater recharge may contain organic and inorganic compounds which can be in dissolved and colloidal forms or associated to particles. Previous researches showed an impact of waters quality due to anthropogenic and geogenic contaminants (Bras et al., 2007; Emmanuel et al., 2007; Bras et al., 2009; Simon et al., 2013) Lead concentrations ranging from 40 µg/L to 90 µg/L were measured in these groundwater resources (Angerville et al. 2004; Emmanuel et al., 2009). The values, measured for some heavy metals in Port-au-Prince groundwater, are largely higher than threshold values recommended for drinking water (WHO 2004). Therefore, Fifi et al. (2009) studied three sites at Cul-de-sac plain to assess the soil reactivity towards heavy metals. In this study, the authors concluded that heavy metals transfer into soil and groundwater is governed by diversified physicochemical mechanisms. In addition to bacterial and metal contaminations, it was found that Cul-de-Sac aquifers are also exposed to seawater pollution (Simonot, 1982; Bois et al., 1999; Emmanuel et al., 2004).

3.2. Sampling and physicochemical analysis

Five water samples have been collected in April 2005, at the beginning of the rainy season. All the samples were placed in plastic containers with a volume of 1 L. These recipients were rinsed 3 times with the water to be examined. To fill the recipients, we used an improved manual sampling method consisting in preparing an average sample over 100 min (1h40 min) with a sampling time step of 100 ml every 10 min.

Electrical conductivity, pH, calcium and total hardness were retained as the physicochemical parameters for this study. Electric conductivity and pH were measured directly on site after sampling. The recipients containing the water samples for total hardness and calcium measurements were carefully labelled and conserved at 4 °C. Once taken, the samples were transported to the laboratory in less than two hour.

The pH of water samples was measured using a WTW pH 340 ION. This instrument has 2 electrodes: an electrode of reference, metal type and an electrode (specific to the measurement of the pH) out of glass. Electric conductivity was measured on the sampling sites using a WTW–LF 330 multipurpose potentiometer coupled with specific electrodes.

The French protocols, EDTA titrimetric method NF T 90-003 and NF T 90-016, proposed by AFNOR (1997) were used for analysing total hardness Ca^{2+}. Magnesium hardness and Mg^{2+} has been estimated by application of equation 1.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Results of physicochemical analyses of water samples from the private borehole

The results of the physicochemical analyses for the 5 water samples from the private borehole are summarised in Table 3. The values obtained for pH [7.37 - 8.01] indicate a low alkaline range, with a variation of pH lower than 1 unit.

Table 3. Results of the physicochemical characterisation of water samples from the private borehole

Parameters	Unit	Average	Minima	Maxima	Standard deviation	n
pH	-	7.73	7.37	8.01	0.27	5
Electrical conductivity	µS/cm	316.2	300	330	12.48	5
Total hardness	mg/L	213.55	205.91	222.84	7.21	5
Ca^{2+}	mg/L	75.56	72.6	79.1	2.47	5
Mg^{2+}	mg/L	6.04	5.58	6.9	0.54	5

Electrical conductivity values varied from 300 to 330 µS/cm. The water samples were not salted water. These values were lower than 400 µS/cm, i.e., the maximum threshold value for drinking water (ERB, 1999).

High concentrations of calcium [72.6 - 79.1] were obtained, while low magnesium [5.58 - 6.9] values were measured from the water samples. Both concentrations have been obtained on water samples collected during the beginning of April rainy season. The most important concentration of calcium from the borehole [79.1 mg/L] is lower than the highest value from the spring water. The minima value of magnesium from the borehole is equal the magnesium concentration in water sample from the spring water of Tête de l'eau (TRACTEBEL, 1998).

Sprinkle (1989) has identified a sequence of hydrochemical evolution of hardness in groundwater. This sequence starts with calcite dissolution in recharge areas that produces a calcium-bicarbonate dominated water type with a total dissolved solids (TDS) concentration of generally less than 250mg/L. In this study on the water samples from the borehole, TDS were not retained as physicochemical parameters to be determined. However, values can be estimated for TDS from the existing theoretical ratio between TDS and conductivity.

Theoretically, this ratio is an empirical factor that can vary from 0.55 to 0.9 depending on the soluble components of the water and on the measurement temperature. Relatively high factors may apply to saline or boiler waters, whereas lower factors may apply where considerable hydroxide or free acid is present (Eaton et al., 1995). Since pH in this study varied from 7.37 to 8.01, which indicated the presence of hydroxide, probably at low concentration, and the electrical conductivity (EC) from 300 to 330 µS/cm, it is obvious that the samples studied were fresh water. In this context a low factor or ratio (TDS/EC = 0.65) has been retained to estimate the TDS values, which varied from 195 to 215 mg/L lower than 250 mg/L. The criteria used to estimate the TDS and the results obtained from the ratio TDS/EC seem to explain the beginning of the process of dissolution of calcite during the first rains of the wet season.

Important concentrations of total hardness were measured on water samples from the private borehole. Total hardness value varied from 206 to 223 mg/L (as CaCO3), which are higher than 180 mg/L. Water samples from this aquifer are very hard (Desjardins, 1988; INERIS, 2004; Dissanayake and Chandrajith, 2009).

The combination of geology and hydrology of a watershed is important in determining the hardness of water resources (Rubenowitz-Lundin and Hiscock, 2005). The geology and hydrogeology of the region in which the hospital in this study is located are dominated by a karstic aquifer. The main characteristics of the karstic aquifers, which are dominated the region of Port-au-Prince, are that they have irregular pores, cracks, fractures and conduits of various shapes and dimensions. This type of physically and geometrically heterogeneous structure gives rise to complex hydraulic conditions, with hydraulic parameters subject to considerable variations in time and space. After a precipitation, the rapid and turbulent replenishment of the groundwater occurs via the drainage of high volumes of non-filtered water through large channels (Denić-Jukić and Jukić, 2003). As a result in the specific case of the MAPP, it seems that the aquifer attains a high concentration of dissolved solid matters and is characterized as hard water.

Generally, where the soil or the unsaturated zone of the aquifer system is composed only of limestone, the total hardness is equivalent to carbonate limestone and is lower than 120 mg/L. The total hardness values measured on water samples from the borehole indicate the presence of other minerals in the unsaturated zone of the aquifer. Indeed, Emmanuel et al (2009) have made investigations of the site in which the borehole examined is situated. They presented data relating to boring a private well to supply a hospital, which is located at 100 meters from the well used in this study. The different geological formations of the non saturated area and the well shaft plan of the hospital borehole are shown in Fig. 2.

4.2. Low Mg concentration: a public health perspective

The crustal abundance of Mg is much lower as compared to Ca and hence to lower abundance of Mg in the natural waters, the average Ca/Mg ratio being 4 (Dissanayake and Chandrajith, 2009). In this stu-

dy, the Ca/Mg ratio varied from 11.06 to 13.58. As shown in table 4 and 5, the values of this ratio for water samples from the borehole, were higher than the values estimated for the samples from the spring water except for the Tête de l'eau value. Otherwise, for all magnesium concentration higher than 7 mg/L a ratio between calcium hardness and magnesium lower than 4 was observed.

Table 4. Average hardness and Ca2+/ Mg2+ ratio of water samples from 12 spring waters used in the MAPP (TRACTEBEL, 1998; Emmanuel et Lindskog, 2002; Simon et al., 2013)

Spring Water	TH[a]	CH[b]	MH[c]	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ratio CH/MH	Ratio Ca^{2+}/ Mg^{2+}
Chadeau	231.2	191.36	39.84	76.64	9.67	4.80	7.92
Desplumes 1&2	249	204.5	44.5	81.90	10.81	4.60	7.58
Tête de l'eau	204	181	23	72.49	5.59	7.87	12.98
Diquini	225	183	42	73.29	10.20	4.36	7.19
Tunnel Diquini	221.95	178.13	43.82	71.34	10.64	4.07	6.70
Leclerc	280.6	233.6	46.8	93.55	11.36	4.99	8.23
Mahotières	268.67	232	36.67	92.91	8.90	6.33	10.43
Corosol	203.7	165.7	38.13	66.36	9.26	4.35	7.17
Mariani	227.15	184.86	42.29	74.03	10.27	4.37	7.21
Métivi	270	226.5	43.5	90.71	10.56	5.21	8.59
Mme. Baptiste	2 16.67	187.67	29	75.16	7.04	6.47	10.67
Turgeau	246.99	202.33	44.66	81.03	10.85	4.53	7.47

[a]TH: Total Hardness; [b]CH: Calcium Hardness; [c]MH: Magnesium Hardness

Table 5. Average hardness and Ca^{2+}/ Mg^{2+} ratio of the 5 water samples from the private borehole

Sample	TH[a]	CH[b]	MH[c]	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ratio CH/MH	Ratio Ca^{2+}/ Mg^{2+}
1	218,94	190,52	28,41	76,3	6,9	6,71	11,06
2	222,84	197,51	25,33	79,1	6,15	7,80	12,86
3	205,91	181,28	24,63	72,6	5,98	7,36	12,14
4	212,25	189,27	22,98	75,8	5,58	8,24	13,58
5	207,84	184,78	23,06	74	5,6	8,01	13,21

[a]TH: Total Hardness; [b]CH: Calcium Hardness; [c]MH: Magnesium Hardness

In the future, it seems important to carry out observations on iron concentration in the study of hardness from Port-au-Prince water resources. Indeed, in its study, TRACTEBEL (1998) showed not merely that the water from all emergencies in northern limestone part of the Massif de la Selle have total hardness greater than 200 mg /L, but reported a level of iron (0.30 mg/L) from water sample from Tête de l'eau spring water.

Magnesium concentrations in samples collected during the rainy season were lower than 7 mg/L. Since Port-au-Prince does not have an efficient urban waste management system (for liquids and solids), the main geological characteristic of this urban area facilitates the transfer of surface pollution to groundwater following storms (Denić-Jukić and Jukić, 2003). Indeed, groundwater with higher total hardness can also results from contamination (Sprinkle, 1989). In this context, interactions between magnesium and other elements could take place. The establishment of a monitoring system, including the characterisation of hardness during rainy and dry seasons, should allow to observe the variations of magnesium during the different seasons.

The presence of magnesium at lower concentrations in water samples from the boreholes is an important indicator of public health. Indeed, low magnesium concentration in water hardness has been considered as the element responsible of the association between water hardness and cardiovascular diseases. It seems that the hazards for human health are more important when magnesium concentrations are

lower than 6 mg/L. Indeed, Marier and Neri (1985) attempted to quantify the importance of water magnesium using a number of epidemiological studies. They estimated that an increase in water magnesium level of 6 mg/L would decrease coronary heart disease mortality by approximately 10%. In this study 60% of the results were lower than 6 mg/L. In the future, epidemiological data could be collected during sampling campaign of water samples in order to establish the correlation between low magnesium concentration in water hardness and cardiovascular diseases. These results should be confirmed by studies involving a larger sample size during rainy and dry seasons.

CONCLUSION

The aim of this study was: (i) to review the chemistry and toxicology of Ca^{2+} and Mg^{2+} in order (ii) to characterize hardness, with a specific emphasis on Mg concentration, in Port-au-Prince groundwater. Magnesium concentrations in samples collected during the first week of the rainy season were lower than 7 mg/L. It would be interesting to confirm these results by carrying out epidemiological studies on the exposed population. It is also necessary to characterise total hardness, including magnesium concentration, with a larger number of water samples during rainy and dry seasons.

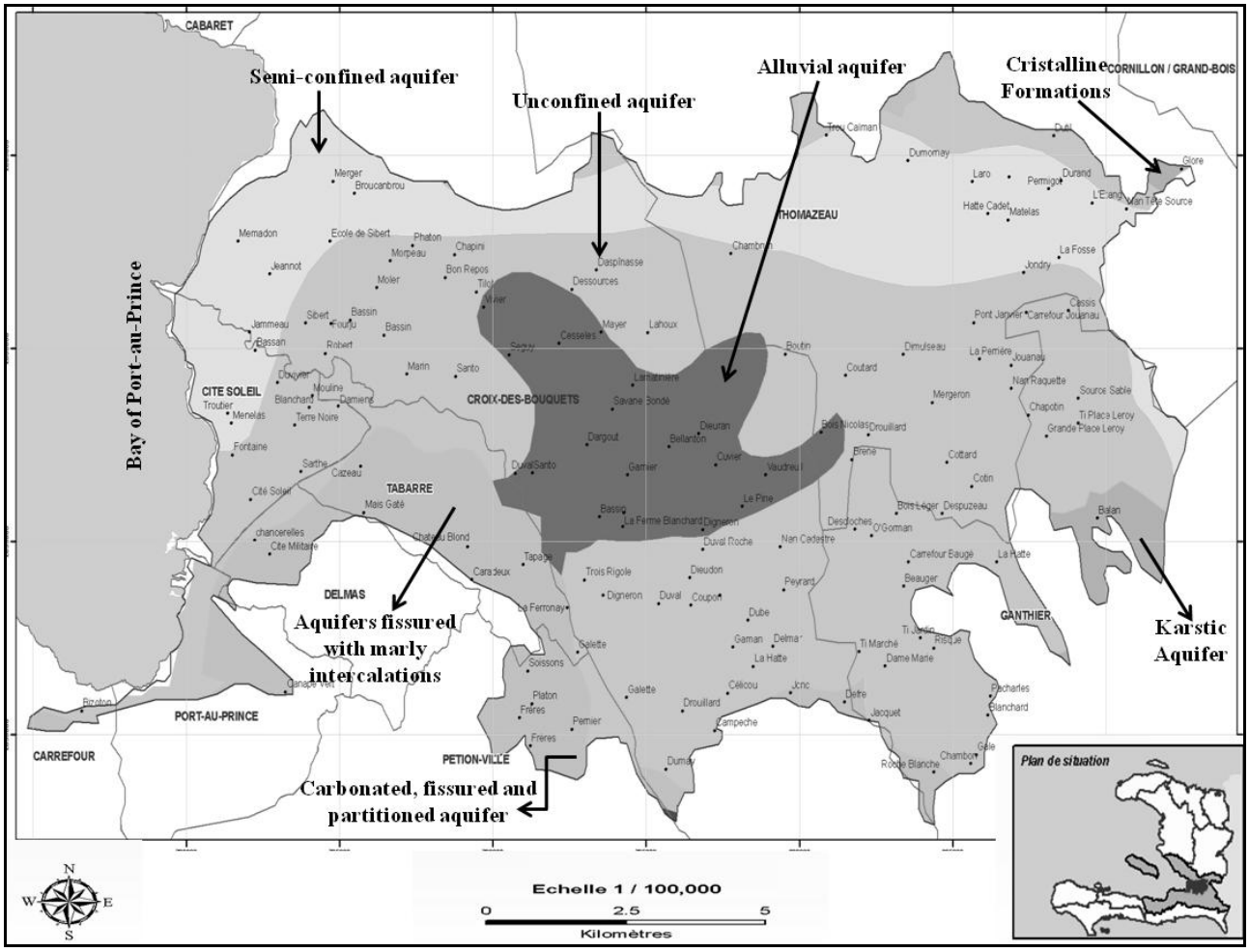


Figure 1: Aquifers systems of plain of Cul-de-sac (Fifi et al, 2010)

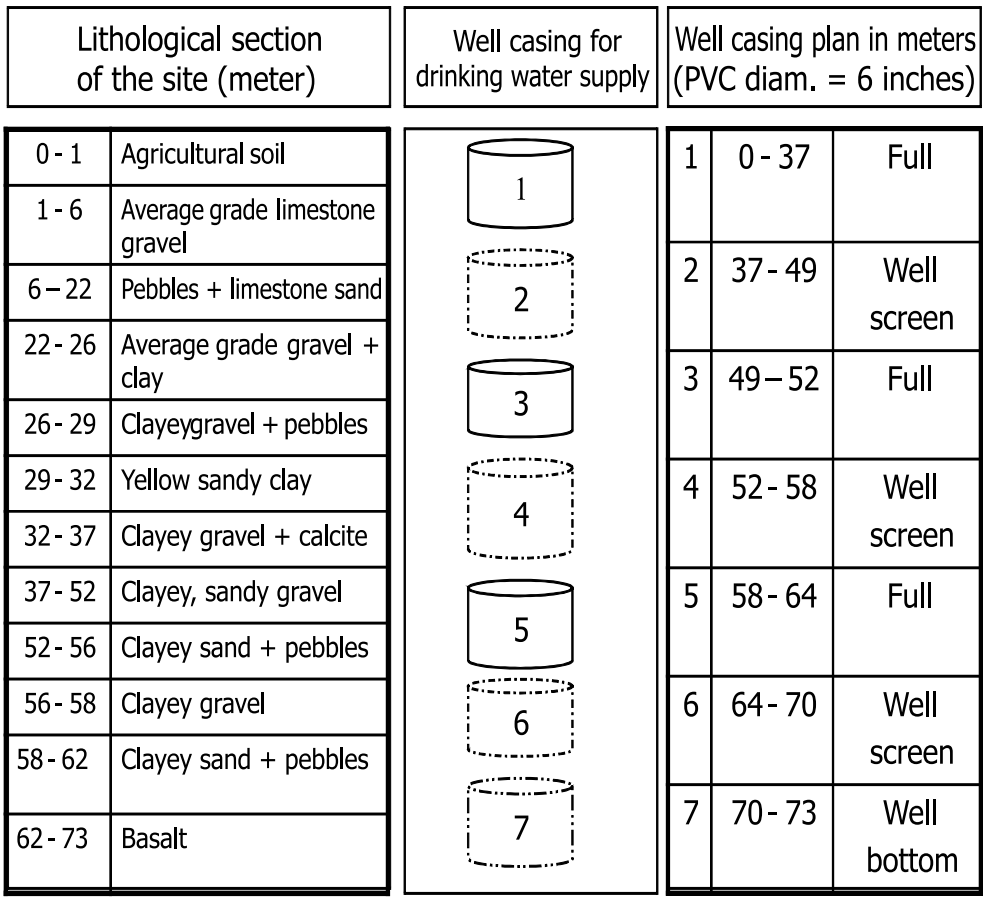


Figure 2: Well casing plan for the borehole (Emmanuel et al, 2009)

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the FOKAL (Fondation Connaissance et Liberté), The Open Society Foundations – Haiti, and the Group Croissance S.A. for their financial support.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR (Association Française de Normalisation) (1997) Qualité de l'eau, Tome 3: Méthodes d'analyse 2, éléments majeurs, autres éléments et composés minéraux. Recueil de Normes Françaises, Paris, p.496.

Altura B.M., Altura B.T. 1996. Role of magnesium in pato-physiological processes and the clinical utility of magnesium ion selective electrodes. Scand. J. Clin. Lab. Invest. 56:211-234.

Angerville R., Rony F.J., Accou K.B., Joseph O., Emmanuel E. and Perrodin, Y. (2004). Assessment of human exposures to lead in drinking water. In AIDIS (Ed.): Proceedings of the XXIX Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, San Juan, Puerto Rico, 21–28 de agosto, CDROM.

Baker S.B., Worthley L.I.G. 2002. The essentials of calcium, magnesium and phosphate metabolism: part I. Physiology. Critical care resuscitation. 4: 301-306.

Berthollet A. 2003.Le magnésium: un nutriment important. Forum Med Suisse. 27: 638-640.

Bois M., Emmanuel E., Prévilon E., Laraque E. (1999). Water salinity evaluation from the principal wells of Cul-de-Sac groundwater supplying tank trucks. Proceedings of 8th annual CWWA and 4th AIDIS région 1 conférence. Kingston, Jamaica, October 4 to 8. CDROM.

Bootman M.D., Collins T.J., Peppiatt C.M., Prothero L.S., MacKenzie L., De Smet P., Travers M., Tovey S.C., Seo J.T., Berridge M.J., Ciccolini F., Lipp P. 2001. Calcium signalling—an overview. Semin Cell Dev Biol 12:3–10.

Bras A., Emmanuel E., Lilite O., Brasseur P., Pape J.W., Raccurt C.. Evaluation du risque dû à Cryptosporidium sp présent dans l'eau de boisson à Port-au-Prince, Haïti. Environnement, Risques et Santé, 2007, 6 (5) 355-364.

Bras A., Berdier C., Emmanuel E., Zimmermann M. Problems and current practices of solid waste mana-

gement in developing countries – Case study from Port-au-Prince (Haiti). Waste Management, Vol 29 (2009) 11 : 2907-2909

Butterlin J. (1960). Géologie générale de la République d'Haïti. Institut des Hautes Études de l'Amérique Latine, Paris, 194p.

Cappucio F., Elliot P., Allender P.S., Pryer j., Follman P. A., Cutler J.A. 1995. Epidemiologic association between diatary calcium intake and blod pressure: a meta analyss of published data. Am. J. Epidemiol.142: 935-945.

Cardarelli F. Materials handbook : a concise desktop reference. Springer, 2008, 1378p. ISBN 1846286697.

Covili F., Jacob L. 2001. Hypercalcemie aiguë. Conférences d'actualisation. Editions Scientifiques et Médicales Elsevier SAS, et Sfar, France.p.571-596.

Denić-Jukić V, Jukić D. Composite transfer functions for karst aquifers. J Hydrol, 2003;274:80–94.

Dissanayake C.B., Chandrajith R. 2008. Introduction to medical geology. Springer Dordrecht Heidelberg, London, New York, 297p.

Eaton A.D., Clesceri L.S., Greenberg A.E. (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th edition, APHA, AWWA, WEF, Washington D.C.

Eisenberg M.J.1992. Magnesium deficiency and sudden death. Am. Heart j., 124:544-549.

Emmanuel E. 2004. Évaluation de risques sanitaire et écotoxicologiques liées aux effluents hospitaliers, thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Université de Lyon, France. p. 259

Emmanuel E., Joseph O., Fanfan P.N., Vermande P., Winiarski T. Trend analysis of the groundwater salinity of the Cul-de-sac aquifer in Haiti. Proceedings of the XXIX Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. San Juan, Puerto Rico, 22–28 de agosto; 2004. CDROM.

Emmanuel E., Angerville R., Joseph O. and Perrodin Y. (2007) Human health risk assessment of lead in drinking water: a case study from Port-au-Prince, Haiti Int. J. Environment and Pollution, Vol. 31, Nos. 3/4, pp.280–291.

Emmanuel E., Pierre M.G., Perrodin Y. 2009. Groundwater contamination by microbiological and chemical substances released from hospital wastewater: Health risk assessment for drinking water consumers. Environment International 35: 718–726.

Fifi U., Winiarski T., Emmanuel E. 2009. Sorption Mechanisms Studies of Pb (II) Cd (II) and Cu (II) into Soil of Port-au-Prince. AQUA-LAC, Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean, Aqua-Lac 1 (2): 164–171.

Fifi U., Winiarski T., Emmanuel E. Impact of surface runoff on the aquifers of Port-au-Prince, Haiti. In.: Eddie N. Laboy-Nieves, Matheus Goosen and Evens Emmanuel (Editors). Environmental and Human Health: Risk Management in Developing Countries. London:Taylor and Francis. 2010, pp. 123-140.

Freeze R. A., Cherry J. A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

INERIS.2004. Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM. Paris :INERIS 85p. Available on :

http://www.ineris.fr/centredoc/03_0693_Rapp_Technique_biodisp_ecot.pdf

Kobayashi J. 1957.On geographical Relations Between the Chemical Nature of River Water and Death Rate from Apoplexy, Berich. Ohara Inst. Landwirtsh. biol.11: 12-21.

Marier J.R., Neri L.L. (1985). Quantifying the role of magnesium in the interrelation between human mortality/morbidity and water hardness. Magnesium, 4:53-59.

PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement). Développement et gestion des ressources en eau. Haïti : Disponibilité en eau et adéquation aux besoins. Vol. IV, Projet HAI/86/03, New-York, 1991, 50 p.

Ropp R.C. Encyclopedia of the alkine earth compounds. Elsevier Science & Technology, 2013, 1250p. ISBN 0444595538.

Simon Y., Alfred F., Charles T., Martin M., Emmanuel E., Poitevien G., Balthazard-Accou K., Emmanuel E. Health hazard assessment of water hardness and cardiovascular diseases. Case study from Port-au-Prince (Haiti). In.: Procedings of the 5th International Conference on Medical Geology – MEDGEO-2003. Arlington, Virginia, 25-29th August 2013. Available from: (consulted 10/25/2013) https://gsa.confex.com/gsa/2013MED/webprogram/Paper218296.html

Simonot M. (1982). Les ressources en eau souterraine de la région de Port-au-Prince. Situation actuelle et recommandation. Projet des Nations Unies, HAI/79/001, Port-au-Prince.

Sprinkle C.L. (1989). Geochemistry of the Florida aquifer system in Florida and in part of Georgia, South Carolina, and Alabama, United States Geological Survey Professional Paper 1403-1.

TRACTEBEL (1998). Définition des périmètres de protection pour les sources exploitées par la CAMEP. Bruxelles:Tractebel Development, 235 p.

[WHO] World Heath Organization. 2004. Guidelines for drinking water quality: Volume 1 recommendations, 3rd Edition [internet]. Geneva. 540 p. Available from: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf.

EFFECTIVENESS OF A NEW METHOD (SOFTWARE) TO EVALUATE THE IMPACTS OF THE MADDEN-JULIAN OSCILLATION ON RAINFALL IN CENTRAL AND SOUTH AMERICA

EFICACIA DE UN NUEVO MÉTODO (SOFTWARE) PARA EVALUAR LOS IMPACTOS DE LA OSCILACIÓN DE MADDEN-JULIAN DE LAS PRECIPITACIONES EN AMÉRICA CENTRAL Y DEL SUR

Jason Giovannettone*, Franklin Paredes**, Roberto Seiler***, Andres Ravelo****

Abstract:

Knowledge of the rainfall distribution over a region is a prerequisite to any attempt at efficient water resources management and, in the face of a changing global climate, reveals regions vulnerable to more frequent extreme events. This knowledge will help to determine the climate adaptation measures that are needed for a particular community with regard to more intense extreme events. With this in mind, a free tool referred to as ICI-RAFT was developed at the International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM) to estimate the frequency/intensity of a rainfall event of a particular duration using ground-based rainfall observations. ICI-RAFT accomplishes this through Regional Frequency Analysis using the method of L-Moments. In order to judge the effectiveness of ICI-RAFT, three case studies were performed in selected regions within Argentina, Nicaragua, and Venezuela. Each study uses rainfall data provided in each region and attempts to identify a global climate index capable of predicting if rainfall will be greater than or less than average several months in advance for a particular season using lag times between 1 and 6 months. It was found that total rainfall for selected seasons correlated best with the Madden-Julian Oscillation (MJO) in each region, particularly with MJO activity over central Africa and the western Indian Ocean, and that the MJO could be used as a predictor of rainfall 3 to 4 months in advance. Critical values of the MJO were estimated for each region; MJO index values greater than or less than these critical values caused greater than or less than average total rainfall and vice versa for the season being analyzed. Substantial differences of up to 40 percent were observed when looking at the intensities associated with a specific rainfall frequency and the value of the MJO index compared to its critical value for a region. Linear regressions were also performed in order to better quantify these relationships; R^2 values for all three regions were greater than 0.50.

Keywords: frequency analysis, Madden-Julian Oscillation, rainfall distribution, extreme events, climate change.

Resumen:

Conocimiento de la distribución de lluvia sobre un área es un requisito para cualquier intento de la gestión eficiente de recursos hídricos y, en el frente del clima cambiante, muestra las regiones más vulnerables a un aumento de los eventos extremos. Este conocimiento va a ayudar a determinar las medidas contra el cambio climático que se necesitan para una comunidad en particular con respecto a los eventos extremos más intensos. Con esta en mente, una herramienta libre se conoce como ICI-RAFT fue desarrollada en el Centro Internacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (ICIWaRM) para estimar la frecuencia/intensidad de un evento de lluvia de una duración determinada utilizando observaciones aéreas de lluvias. ICI-RAFT logra esto a través de Análisis Regional de Frecuencias mediante el método de L-Momentos. Para juzgar la eficacia de ICI-RAFT, tres estudios de caso se realizaron en regiones seleccionadas en Argentina, Nicaragua y Venezuela. Cada estudio utiliza datos de las precipitaciones previstas en cada región y trata de identificar un índice de clima global capaz de predecir si la lluvia será mayor o menor que la media con varios meses de antelación para una estación en particular utilizando los tiempos de retardo entre 1 y 6 meses. Se encontró que la precipitación total para las estaciones seleccionadas se correlacionaron mejor con la Oscilación de Madden-Julian (MJO) en cada región, en particular con la actividad de la MJO sobre el centro de África y el Océano Indico occidental, y que la MJO podrían utilizarse como predictor de lluvia tres a cuatro meses de antelación. Los valores críticos de la MJO se estimaron para cada región; valores de MJO índice mayores que o menor que estos valores críticos causados mayor que o menor que la precipitación total promedio y viceversa para la temporada que se analiza. Se observaron diferencies sustanciales de alrededor de 40 por ciento cuando se mira en las intensidades asociadas con una frecuencia de precipitaciones específica y el valor del índice de la MJO en comparación con su valor crítico para una región. Regresiones lineales también se realizaron con el fin de cuantificar mejor estas relaciones; valores de R^2 para las tres regiones fueron mayores que 0,50.

Palabras importantes: análisis de frecuencias, Oscilación Madden-Julian, distribución de las precipitaciones, fenómenos extremos, cambio climático.

* HydroMet, LLC; Jason.Giovannettone@hydromet-analyses.com

** Universidad Nacional Experimental de Los Llanos Ezequiel Zamora.

*** Universidad Nacional de Río Cuarto.

**** Universidad Nacional de Córdoba.

Recibido: 28/08/2013
Aceptado: 25/03/2014

INTRODUCTION

The hydrologic cycle begins and ends with precipitation; therefore, knowledge of the amount and distribution of rainfall over an area is a prerequisite for any attempt at efficient water resources management. In addition, in the face of a changing global climate, knowledge of the distribution of rainfall reveals regions that are most vulnerable to an increase in extreme events, such as floods and droughts. This knowledge will help to determine the climate adaptation measures that are needed for a particular community with regard to more intense extreme events. Researchers also seek to develop robust, defensible, low-error methods for frequency analysis so that users, such as decision makers tasked with addressing recurring physical events, can make estimates that are more certain, transparent, and consistent. The goal is to help answer questions such as:

1. Will the next growing season have above or below average rainfall?
2. Should available water storage be increased prior to the next rainy season?
3. What is the frequency of the maximum drought and flood intensities that have been observed in my region?

With these questions in mind and based on the method of Regional Frequency Analysis (RFA) and L-moments (Hosking & Wallis, 1997), a tool was developed to estimate the frequency/intensity of a rainfall event of a particular duration using ground-based rainfall observations. Some of the code used to develop this tool was taken from the FORTRAN code provided by Hosking & Wallis and rewritten in Visual Basic 2010. This tool was developed at the International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM) and is referred to as the ICIWaRM Regional Analysis of Frequency Tool (ICI-RAFT) (Giovannettone & Wright, 2012).

ICI-RAFT is the result of work performed in order to support the overall mission of ICIWaRM to aid developing countries in water resource management with a focus on climate change adaptation and extreme events. In order to follow the mission of ICIWaRM as a Category II UNESCO center and in the spirit of UNESCO, ICI-RAFT is free; the only costs involve expenses associated with the additional programs that are required to fully utilize ICI-RAFT, such as Microsoft Excel and ESRI ArcGIS or other GIS software.

The method of L-moments is preferred over using regular moments because L-moment statistics are more robust for accommodating extreme values and characterizing a greater number of frequency distributions. In addition, L-moments are less susceptible to bias in their estimation. RFA has the advantage over site frequency analysis in that it helps alleviate the issue of insufficient data at a site. Insufficient data does not allow the user to make accurate estimates of rainfall intensity; this is a concern in arid and semi-arid regions where gauge sites are sparse and where existing rain gauges measurements contain numerous periods of missing data. RFA is used with the assumption that if the frequencies of rainfall events are similar at several nearby locations within a "region", a statistical analysis of all observations at all sites within the "region" will result in a more accurate frequency distribution at each location in comparison to the analysis of individual site data.

METHODOLOGY

ICI-RAFT was designed to be user-friendly, while not compromising its ability to perform the work it was designed to accomplish. The most difficult step of any analysis using ICI-RAFT is the preparation of the input file; the specific input format is discussed in the ICI-RAFT Users' Manual. After the input file is loaded, a data screening window can be accessed that allows the user to specify the desired period for analysis, which consists of the beginning month, duration in months, and a lag, if any, that the user would like to introduce between the precipitation data and the global index values. The ability to compare the input data to any of several global climate indices using various lag times saves a substantial amount of time compared to attempting to perform such an analysis manually. The remainder of the program uses the values entered here when computing event frequencies and intensities and when displaying the various graphs and other features that are available.

In order to study the effectiveness of ICI-RAFT, three case studies were selected for the analysis. The studies take place in selected regions within Argentina, Nicaragua, and Venezuela. Rainfall data were provided at locations throughout each country; total rainfall for specific periods were computed and analyzed with respect to several global climate indices (see Table 1) using lag times ranging from 1 to 6 months. Each analysis attempts to identify a global climate index capable of predicting above or below average rainfall several months in advance, qualitatively and using an equation that is developed. One such index is the Madden-Julian Oscillation, which is considered the largest element of intra-seasonal (30 – 90 days) variability in the tropical atmosphere and, unlike other indices, is characterized by the eastward propagation of large areas of convective anomalies near the equator, propagating from the Indian Ocean east into the Pacific Ocean. The anomalies are monitored globally using ten different indices located on lines of longitude near the equator, with seven in the eastern hemisphere and three in the western hemisphere. The longitudes each index represents are: (1) 80°E, (2) 100°E, (3) 120°E, (4) 140°E, (5) 160°E, (6) 120°W, (7) 40°W, (8) 10°W, (9) 20°E, and (10) 70°E. It was found that the MJO is linked to summer rainfall in Southeast China (Zhang et al., 2009) and southern Africa (Pohl et al., 2007) and to rainfall patterns in Australia (Wheeler et al., 2009). The final section will summarize the findings of each case study into a simple set of conclusions.

Table 1: Global climate indices and range of values for each since 1948.

Abbreviation	Full Name	Range	Citation(s)
AAO	Antarctic Oscillation	-3.01 to 2.69	Thompson & Wallace (2000)
AO	Arctic Oscillation	-4.27 to 3.50	Lorenz (1951)
EA	East Atlantic Index	-3.33 to 2.68	Barnston & Livezey (1987)
EA/WR	Eastern Atlantic/Western Russia Index	-4.17 to 3.68	Barnston & Livezey (1987)
EP/NP	East Pacific/North Pacific Index	-2.96 to 3.88	Bell & Janowiak (1995)
MJO	Madden-Julian Oscillation	-2.02 to 2.01	Madden & Julian (1971)
NAO	North Atlantic Oscillation	-3.14 to 3.06	Walker & Bliss (1932); Barnston & Livezey (1987)
NOI	Northern Oscillation Index	-12.20 to 8.68	Schwing et al. (2002)
NP	North Pacific Index	996.44 to 1020.99	Walker & Bliss (1932); Barnston & Livezey (1987); Trenberth & Hurrell (1994)
ONI	Oceanic Niño Index	-2.10 to 2.50	NOAA (2009)
PDO	Pacific Decadal Oscillation	-3.60 to 3.51	Mantua et al. (1997)
PNA	Pacific/North American Index	-3.65 to 2.87	Wallace & Gutzler (1981)
POL	Polar/Eurasia Index	-3.44 to 3.53	Wallace & Gutzler (1981); Barnston & Livezey (1987)
SCA	Scandinavian Index	-2.44 to 3.15	Barnston & Livezey (1987)
SOI	Southern Oscillation Index	-3.60 to 2.90	Walker & Bliss (1932); Bjerknes (1969)
WP	West Pacific Index	-3.45 to 3.39	Wallace & Gutzler (1981)

RESULTS

Case Study #1: Argentina

Rainfall data were provided for twenty climate stations located in a region in west-central Argentina. A correlation is attempted between each station's total rainfall over a range of months and different global climate indices averagedta over an equal range of months, while considering temporal lags of 0 to 6 months between both ranges. It was found that the index showing the highest correlation with precipitation was the Madden-Julian Oscillation, in particular the components associated with regions in central Africa (MJO9) and the western Indian Ocean (MJO10). The highest correlation was found to occur between October and January using a lag of 4 or 5 months between the MJO index values and the precipitation events. Locations showing the highest correlations are Las Acequias (33º 16' S, 63º 59' W) (LCQ), Marcos Juarez (32° 41' S, 62° 06'W) (MJR), Ucacha (33° 03' S, 63° 30' W) (UCH), and Las Vertientes (33° 17' S, 64° 35' W) (LVR); results are shown in Fig. 1.

Figure 1 demonstrates that it is possible to make a somewhat accurate estimate of the total rainfall during the period of October – January four to five months prior. This result shows a strong signal between the MJO and the total precipitation at these stations that should be investigated in greater detail in future studies. An explanation of the mechanism responsible for this correlations is beyond the scope of this paper; however, the connection between the MJO in the western Indian Ocean and summertime rainfall in west-central Argentina is described in more detail in Agosta and Compagnucci (2012).

Even though it is difficult to predict the amount of rainfall that will occur during a particular season or period at a specific site, it is possible to predict three or four months prior with some accuracy if a particular region will have a higher chance to receive greater than average or less than average rainfall during that period. This concept is shown in Figure 2a for the rain gauge located at station UCH. The dark squares represent annual October – January rainfall during years when the June – September average MJO9 value was < 0.05, whereas the lighter squares represent years when the June – September average MJO9 value was > 0.05. According to the historical data, the station UCH can expect with some confidence that total rainfall from October –January will be average or greater-than-average if the average MJO9 four months prior is > 0.05, and vice versa.

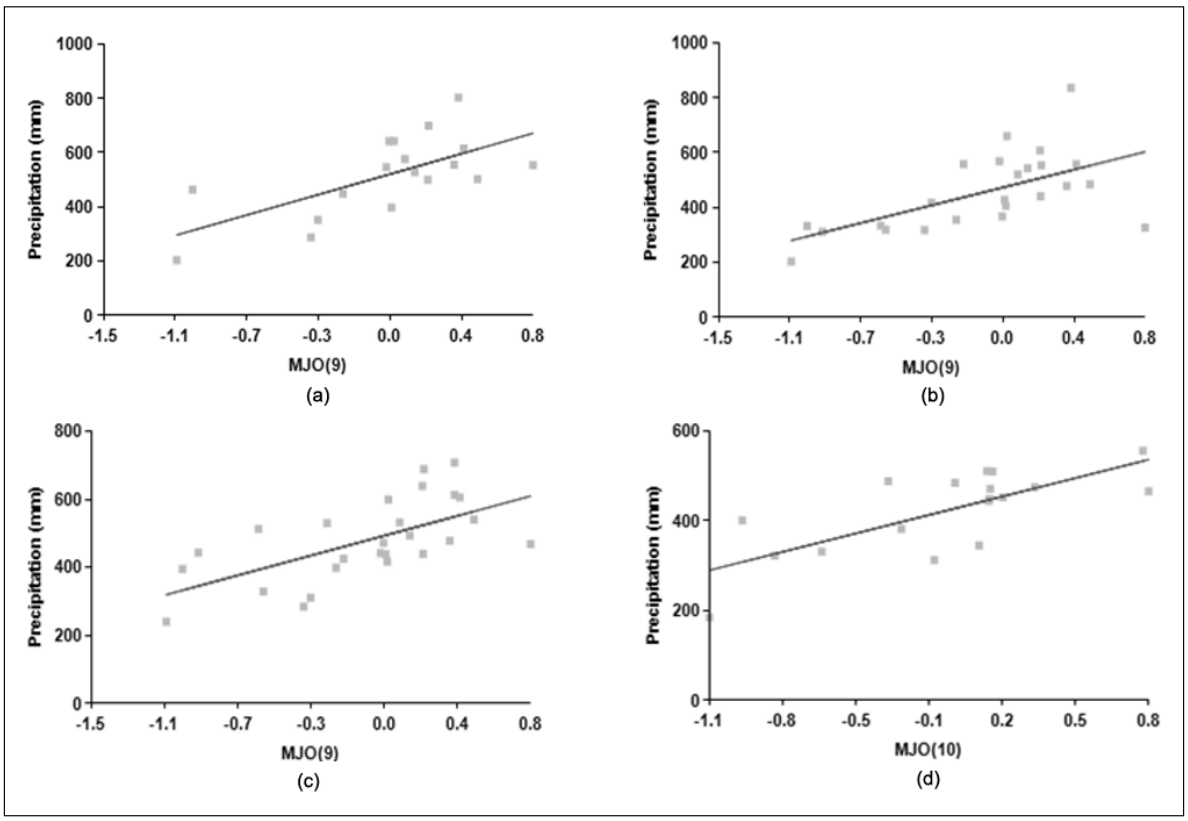


Figure 1: Linear regressions between total October – January rainfall in (a) LCQ, (b) MJR, (c) UCH, y (d) LVR, (squares) and values of the Madden-Julian Oscillation located at longitudes (a, b, c) 20° E and (d) 70° E, using a lag of (a, b, c) 4 and (d) 5 months. R2 values are (a) 0.44, (b) 0.36, (c) 0.39, and (d) 0.54.

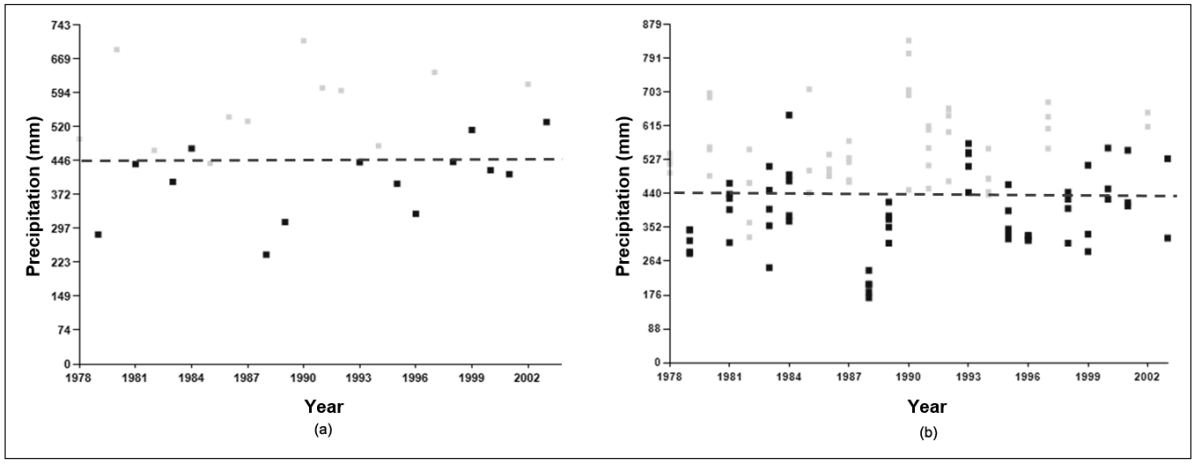


Figure 2: Annual rainfall totals are shown as black squares for the period October – January if the average MJO9 for June – September of the same year was < 0.05 (a) at station UCH and (b) within a region that includes sites MJR, LCQ, UCH, IVR, and LVR. Dashed lines represent average rainfall (a) at UCH (~448 mm) and (b) for the corresponding region (~446 mm) for each period.

In order to study the impact of the MJO9 on total annual rainfall during the period of October - January in more detail, a frequency analysis was performed using data collected at the UCH station. The analysis consisted of three conditions related to the mean value of the MJO9 during the 4-month period of June – September: 1) considering all rainfall data; 2) using rainfall data from those years when the MJO9 was < 0.05; 3) using rainfall data from those years when the MJO9 was > 0.05. The results are shown in Table 2. Some drastic differences can be observed between these results. For example, the 20-year exceedance event using all years is 665 mm; when the average June – September MJO9 > 0.05, this rainfall amount was exceeded every 5 years; when the average MJO9 during the same period was < 0.05, the possibility that UCH would receive greater than 665 mm of rainfall between October and January is almost zero. In fact, according to the current analysis, it is estimated that this rainfall amount has a recurrence period substantially greater than 1,000 years.

Table 2: Exceedance rainfall amounts at station UCH during the period October – January for various frequencies, considering three conditions in relation to the mean MJO9 during June – September. The frequency distribution used was the Generalized Extreme Value (GEV); the conditions of the MJO9 are: 1) all years without considering the value of the MJO9; 2) those years when the MJO9 was > 0.05; 3) those years when the MJO9 < 0.05.

Frequency	All Years (mm)	MJO (9) > 0.05 (mm)	MJO (9) < 0.05 (mm)
0.001	789	857	557
0.002	776	841	555
0.005	754	817	550
0.010	734	794	546
0.020	708	769	539
0.050	665	728	524
0.100	623	691	507
0.200	569	646	481
0.500	462	563	414
0.800	356	487	331
0.900	303	450	283
0.950	260	422	241
0.980	214	391	192
0.990	183	371	159
0.995	156	354	128
0.998	124	334	89
0.999	102	320	62

In a similar manner, non-exceedance probabilities can be analyzed. The 20-year non-exceedance event using all years is 260 mm, but when considering only those years when the average value of the MJO9 during June – September was < 0.05 (the third column of Table 2), the same rainfall total is not received about once in every 15 years. When looking at years when the average MJO9 was > 0.05, however, the possibility that UCH receives less than 260 mm between October and January is negligible. According to the current analysis, it is improbable that UCH would receive less than 350 mm during this period when the average MJO9 is > 0.05.

Five stations out of the twenty stations analyzed in this study showed similar behavior as was described above: MJR, LCQ, UCH, LVR, and IVR. In order to perform a regional analysis for a region that includes these sites, the rainfall totals from each site were combined into one data set. In an attempt to find a method to predict the amount of rainfall that can be expected in a region defined by these sites, all of the October – January rainfall events for each site were plotted, differentiating those events during which the average June - September MJO9 index was > or < 0.05 (Fig. 2b). As can be seen in Fig. 2b, when the average June - September MJO9 index is < -0.05, it can be expected that precipitation within the region between October and January will be below average, whereas when the average June - September MJO9 index is > -0.05, mean rainfall throughout the region can be expected to be greater than average. Afterwards, an attempt was made to develop an equation that can predict the average precipitation to be expected by computing the average rainfall of all sites for each year and plotting this average against the corresponding MJO9 value (Fig. 3). The following trend line was fit to the data:

$$R = 205.93 \times M9 + 491.55, \quad (1)$$

where R is the total rainfall for the period being analyzed (October – January) and M9 is the average value of the MJO9 index during the corresponding period of June – September. R^2 for the trend line is 0.66. Three MJO9 values were not included in the above analysis in order to estimate the error caused by Eq. (1). Values of the MJO9 were chosen near 0.20, -0.20, and -0.60; the exact values and the resulting predictions are shown in Table 3. The highest error in Table 3 is 14% with an average error of approximately 7%.

Table 3: Predictions of rainfall versus observations for three average June – September values of the MJO9 index for a region in central Argentina. Predictions were made using Eq. (1).

MJO9 Value	Observed (mm)	Predicted (mm)	Error (mm)
-0.61	379	366	-13
-0.21	392	448	56
0.23	523	540	17

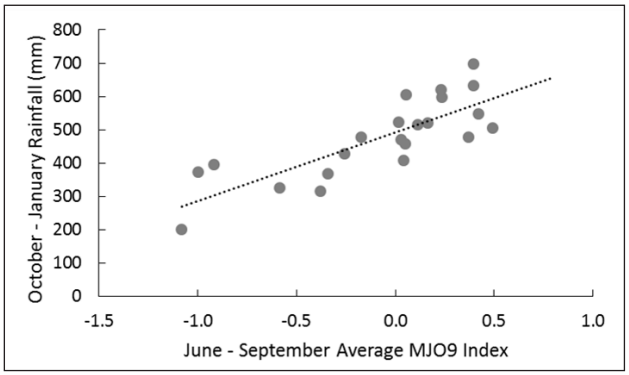


Figure 3: Circles represent the mean total rainfall calculated for the period October – January using stations MJR, LCQ, UCH, IVR, and LVR, for several average 4-month (June - September) values of the MJO9 index. The black line represents a linear trend line based on the data.

Case Study #2: Nicaragua

Rainfall data from several climate stations in Nicaragua were used. As in the previous analysis in Argentina, this analysis correlated various global climate indices with each station's total rainfall using lag times ranging from 0 to 6 months. It was again found that the index that had the greatest correlation to rainfall is the MJO, particularly components associated with the following regions: Western Pacific Ocean (MJO5), Africa (MJO9), and the Western Indian Ocean (MJO10). The highest correlation was produced during the 3-month period of August – October using a lag of three months between MJO values and the rainfall events. The highest correlation between rainfall and the MJO was found at Condega; the results are shown in Fig. 4.

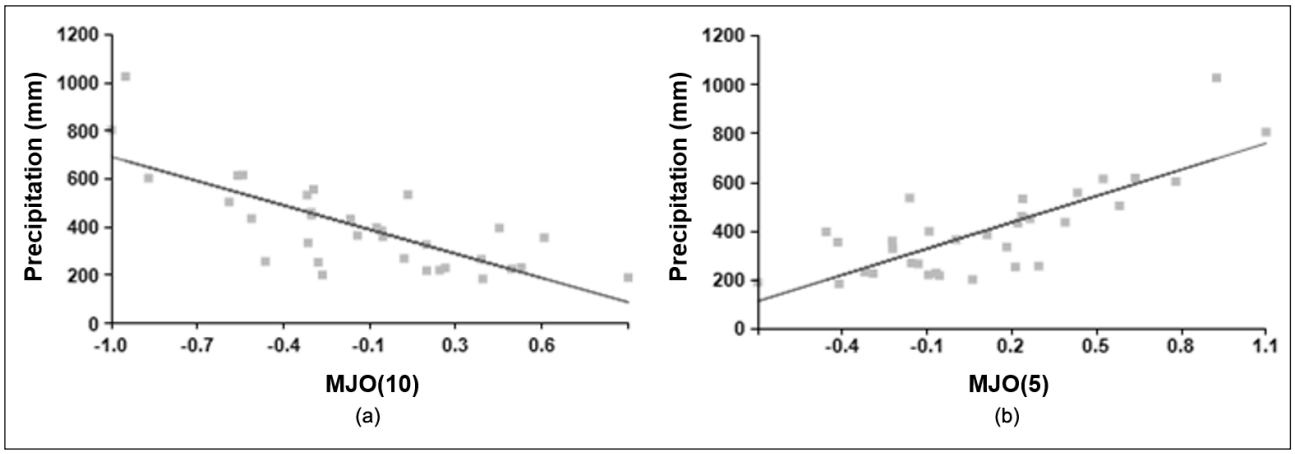


Figure 4: Linear regressions between total August – October rainfall in Condega, Nicaragua, (orange squares) and values of the Madden-Julian Oscillation located at longitudes (a) 70° E and (b) 150° E, using a lag of three months. R2 values are 0.57 and 0.62, respectively.

Figure 4 demonstrates that it is possible to make a somewhat accurate estimate of the total rainfall that is going to occur during the 3-month period of August – October in Condega three months prior. This result shows a strong signal between the MJO and the 3-month precipitation total at Condega that should be investigated in greater detail in future studies.

As mentioned earlier, even though it is difficult to predict the amount of rainfall that will occur during a particular season or period at a specific site, it is possible to predict three months prior with some accuracy if a particular region will have a higher chance to receive greater than average or less than average rainfall during that period. Figure 5a demonstrates this concept for the rain gauge located at Condega. The dark squares represent annual August – October rainfall during years when the May – July average MJO5 value was > 0.205, whereas the lighter squares represent years when the May – June average MJO5 value was < 0.205. According to the historical data, the city of Condega can expect with some confidence that total rainfall from August – October will be average or greater-than-average if the average MJO5 three months prior is < 0.205, and vice versa.

In order to study the impact of the MJO5 on total annual rainfall during August – October in more detail, a frequency analysis was performed on rainfall data collected at Condega. Three conditions related to the mean value of the MJO5 during the 3-month period of May – July were considered: 1) using all rainfall data; 2) using rainfall data from those years when the MJO5 was > 0.205; 3) using rainfall data from those years when the MJO5 was < 0.205. The results are shown in Table 4. Some drastic differences can be observed. For example, the 20-year exceedance event considering all years is 742 mm; when the average May –July MJO5 > 0.205, this rainfall amount was exceeded every 5 – 10 years; when the average MJO5 during the same period was < 0.205, the possibility that Condega would receive greater than 742 mm of rainfall between August and October is almost zero; it is estimated that this rainfall amount has a recurrence period of 1,000 years.

Table 4: Exceedance rainfall amounts in Condega during the period August - October for various frequencies, considering three conditions in relation to the mean MJO5 during May – July. The frequency distribution used was the Pearson Type III; the conditions of the MJO5 are: 1) all years without considering the value of the MJO5; 2) those years when the MJO5 was > 0.205; 3) those years when the MJO5 < 0.205.

Frequency	All Years (mm)	MJO(5) > 0.205 (mm)	MJO(5) < 0.205 (mm)
0.001	1267	1543	741
0.002	1179	1440	697
0.005	1059	1300	638
0.010	967	1193	592
0.020	872	1085	544
0.050	742	937	479
0.100	639	821	427
0.200	528	700	370
0.500	357	520	282
0.800	235	402	218
0.900	189	361	193
0.950	159	335	176
0.980	132	315	161
0.990	118	306	153
0.995	107	299	146
0.998	97	293	140
0.999	92	290	136

In a similar manner, non-exceedance probabilities are analyzed. The 20-year non-exceedance event using all years is 160 mm, but when considering only those years when the average August - October MJO5 was < 0.205 (third column of Table 4), the same rainfall total is not received about once in every 50 years. When looking at years when the average MJO5 was > 0.205, however, the possibility that Condega would receive less than 160 mm of rainfall between August – October is negligible. In fact, according to the current analysis, it is improbable that Condega would receive less than 300 mm during this period when the average MJO5 is > 0.205.

Several stations out of those analyzed in this study showed similar behavior as was described above and were selected for a regional analysis: Condega, Quilali, Santa Rosa de Ventia, Hacienda Palmira, San Fernando, Ocotal, Montañuela, Los Planes, San Francisco, Mina La Reina, Sebaco, Los Robles, Dario, La Labranza, and Tierra Azul. In an attempt to find a way to predict the amount of rainfall that can be expected in a region defined by these sites, all of the August – October rainfall events for each site were plotted, differentiating those events during which the average May – July MJO9 index was > or < -0.10 (Fig. 5b). When the average May – July MJO9 is < -0.10, precipitation within the region between August and October will be likely be greater than average, whereas when the average May – July MJO9 > -0.10, mean rainfall throughout the region can be expected to be below-average. Afterwards, an attempt was made to develop an equation that can predict the average precipitation to be expected, the average rainfall of all sites for each year was computed and plotted against the corresponding MJO9 value (Fig.

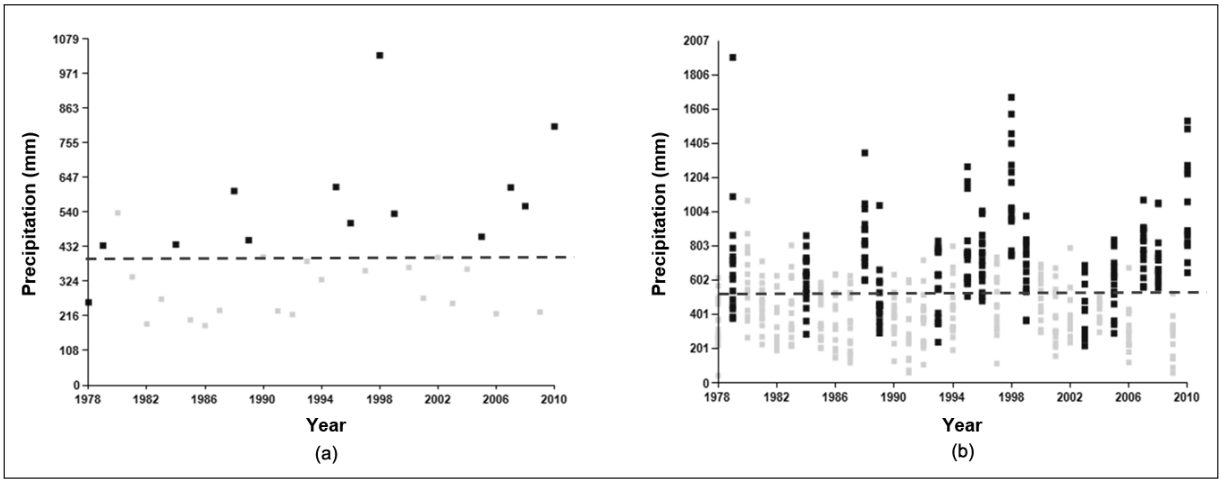


Figure 5: Annual rainfall totals are shown as black squares for the period August – October if (a) the average MJO5 for May – July of the same year was > 0.205 at station Condega and (b) if the average MJO9 for May – July of the same year was < -0.10 within a region that includes sites Condega, Quilali, Santa Rosa de Ventia, Hacienda Palmira, San Fernando, Ocotal, Montañuela, Los Planes, San Francisco, Mina La Reina, Sebaco, Los Robles, Dario, La Labranza, and Tierra Azul. Dashed lines represent average rainfall (a) at Condega (~391 mm) and (b) for the corresponding region (~529 mm) for each period.

6). A trend line using the following equation was fit to the data:

$$R = -442.24 \times M9 + 496.27, \qquad (2)$$

where R is the total rainfall for the period being analyzed (August – October) and M9 is the average value of the MJO9 index during the corresponding period of May - July. The R^2 value of the trend line is 0.68. Three MJO9 values were not included in the above analysis in order to estimate the error of the predictions made by Eq. (2). Values of the MJO9 were chosen near 0.20, -0.20, and -0.60; the exact values and the resulting predictions are shown in Table 5. The highest error in Table 5 is 18% with an average error of approximately 8%.

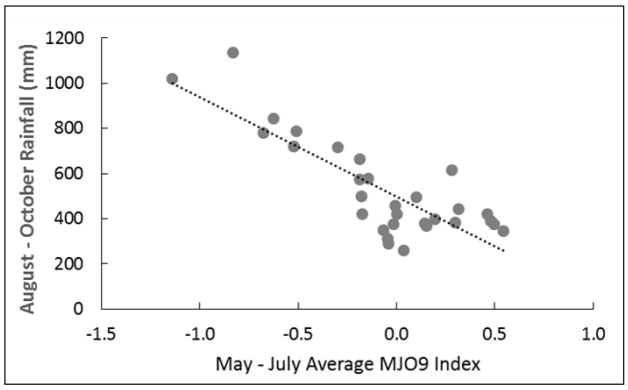


Figure 6: Circles represent the mean total rainfall calculated for the period August – October using the following sites: Condega, Quilali, Santa Rosa de Ventia, Hacienda Palmira, San Fernando, Ocotal, Montañuela, Los Planes, San Francisco, Mina La Reina, Sebaco, Los Robles, Dario, La Labranza, and Tierra Azul, for several average 3-month (May - July) values of the MJO9 index. The black line represents a linear trend line based on the data.

Table 5: Predictions of rainfall versus observations for three average May – July values of the MJO9 index for a region in Nicaragua. Predictions were made using Eq. (2).

MJO9 Value	Observed (mm)	Predicted (mm)	Error (mm)
-0.62	731	770	39
-0.22	599	592	-7
0.23	479	393	-86

Case Study #3: Venezuela

Rainfall data were provided for a myriad of stations located throughout the country of Venezuela. As with the previous two case studies, a correlation is attempted between different global climate indices and each station's total rainfall over a range of months while considering temporal lags between 1 and 6 months. It was again found that the index showing the highest correlation with precipitation was the MJO, in particular the component located over the western Indian Ocean as shown in Fig. 7 for four stations (Station #'s 0031, 0088, 1000, and 1002 in northwest Venezuela). The highest correlation was found to occur between June and August using a lag of 1 month between the MJO index values and the precipitation events.

Figure 8a indicates that it is possible to estimate with some accuracy whether a particular site will receive greater than or less than average precipitation during the three-month period of June to August for a particular site (in this case Station 1002) with one month of lead time. The dark squares represent June – August rainfall events during years when the May – July average MJO10 value was < -0.12, whereas the lighter squares represent years when the May – July average MJO10 value was > -0.12. According to the historical data, Station 1002 can expect with some confidence that accumulated rainfall between June and August will be average or greater-than-average if the average MJO10 during May – July is > -0.12, and vice versa.

In order to study the impact of the MJO10 on total precipitation in more detail during the period of June - August, frequency analyses were performed on the rainfall data collected at Station 1002. As was done earlier, analyses were conducted under three conditions related to the mean value of the MJO10 during May - July: using all rainfall data irrespective of the value of the MJO10; 2) using rainfall data from those years when the average MJO10 was > -0.12; and 3) using rainfall data from those years when the average MJO10 was < -0.12. The results of the frequency analyses are presented in Table 6. Some drastic differences can be observed when comparing these results. For example, the 20-year exceedance event using all years is 420 mm, but when the average May – July MJO10 is > -0.12, the probability of exceeding this amount of rainfall is near zero. In fact, the analysis shows that rainfall amounts greater than 230 mm are improbable under these conditions.

In a similar manner, non-exceedance probabilities can be analyzed. The 20-year non-exceedance event using all years is equal to 45 mm, and when looking at only those years when the May – July MJO10 was > -0.12, total rainfall less than 45 mm will occur approximately every 10 years. When looking at years when the average MJO10 was < -0.12, however, the chances of Station 1002 receiving less than 45 mm of rainfall between June – August are negligible. In fact, according to the current analysis, it is improbable that Station 1002 would receive < 100 mm during this period when the average May – July MJO10 is < -0.12.

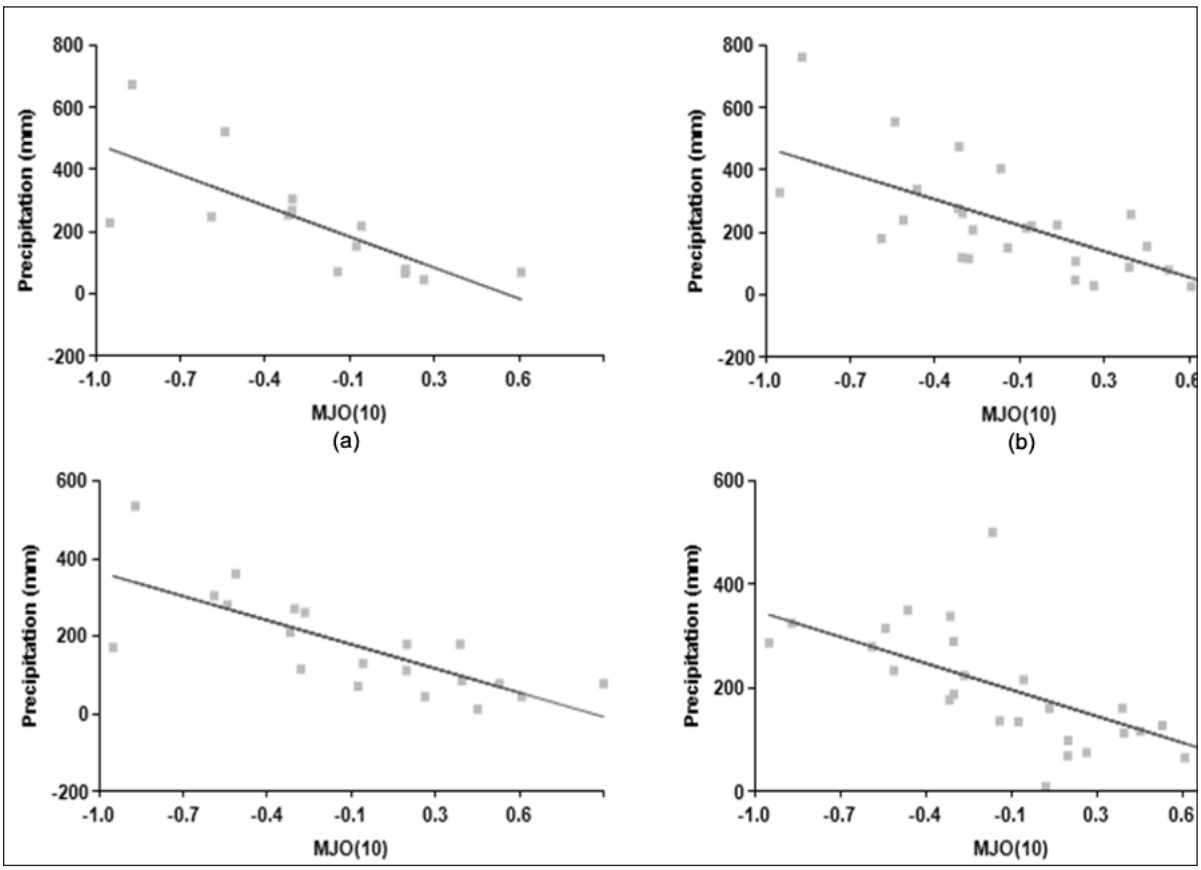


Figure 7: Linear regressions between precipitation at Station #'s (a) 0031, (b) 0088, (c) 1000, and (d) 1002, and values of the Madden-Julian Oscillation located at longitude 100 degrees E (MJO10). Data represents total rainfall during the period June – August, one month out of phase with relation to the corresponding MJO10 values. R2 values are (a) 0.55, (b) 0.46, (c) 0.56, and (d) 0.40.

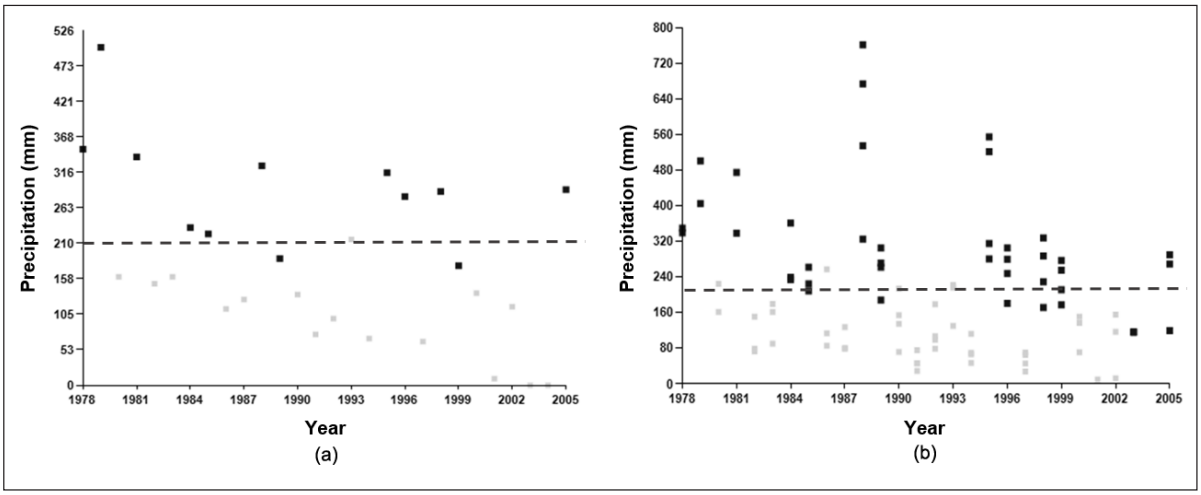


Figure 8: Annual rainfall totals are shown as black squares for the period June – August if the average MJO10 for May – July of the same year was < 0.12 (a) at Station 1002 and (b) within a region that includes Station #'s 0031, 0088, 1000, and 1002. Dashed lines represent average rainfall (a) at Station 1002 (~211 mm) and (b) for the corresponding region (~214 mm) for each period.

Table 6: Exceedance rainfall amounts at Station 1002 during the period June – August for various frequencies considering three conditions in relation to the average MJO10 during the period May – July. The frequency distribution used was the Generalized Extreme Value (GEV); the conditions of the MJO10 are: 1) all years regardless of the state of the MJO10; 2) those years when the MJO10 > -0.12; 3) and those years when the MJO10 < -0.12.

Frequency	All Years (mm)	MJO(10) > -0.12 (mm)	MJO(10) < -0.12 (mm)
0.001	661	229	676
0.002	625	227	640
0.005	574	222	591
0.010	531	216	552
0.020	486	209	511
0.050	419	196	455
0.100	364	183	409
0.200	302	163	359
0.500	198	120	281
0.800	113	72	219
0.900	74	47	192
0.950	45	26	171
0.980	15	2	150
0.990	0	0	137
0.995	0	0	126
0.998	0	0	113
0.999	0	0	105

In order to perform a regional analysis for a region that includes all of the sites shown in Fig. 7, the rainfall totals from each site were combined into one data set, from which a regional frequency analysis could be performed. In an attempt to find a way to predict the amount of rainfall that can be expected in a region defined by these sites, all of the June – August rainfall events for each site were plotted, differentiating those events during which the average May – July MJO10 index was > or < -0.12 (Fig. 8b). When the average May – July MJO10 index is < -0.12, it can be expected that precipitation within the region between June and August will be greater than average, whereas when the average May – July MJO10 index is > -0.12, mean rainfall throughout the region can be expected to be below-average. An attempt was made to develop an equation that can predict the average precipitation to be expected by computing the average rainfall of all sites for each year and plotting this average against the corresponding MJO10 value (Fig. 9). Eq. (3) describes the resulting trend line:

$$R = -221.34 \times M10 + 201.77, \qquad (3)$$

where R is the total rainfall for the period being analyzed (June – August) and M10 is the average value of the MJO10 index during the corresponding period of May - July. R^2 for the trend line is 0.52. Three MJO10 values were not included in the above analysis in order to estimate the error of predictions made by Eq. (3). Values of the MJO10 were chosen near 0.20, -0.20, and -0.60; the results are shown in Table 7. Magnitudes of error ranged from 24 – 105 mm, but the percentage of error was much larger in this case due to the fact that observed precipitation was less and a potential outlier was randomly chosen for the error analysis.

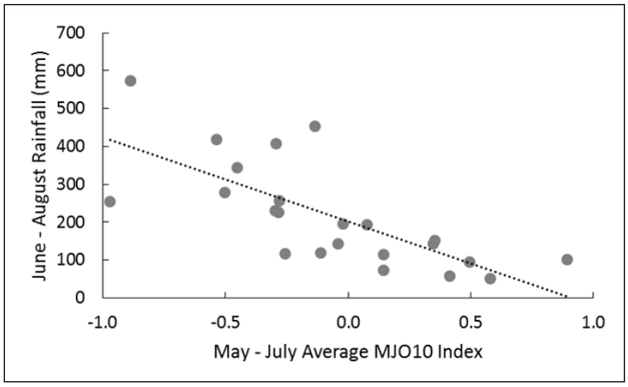


Figure 9: Circles represent the mean total rainfall calculated for the period June – August using rainfall data from Station #'s 0031, 0088, 1000, and 1002, for several average value of the MJO10 index during the period of May – July. The black line represents a linear trend line based on the data.

Table 7: Predictions of rainfall versus observations for three average May – July values of the MJO10 index for a region in northwestern Venezuela. Predictions were made using Eq. (3).

MJO10 Value	Observed (mm)	Predicted (mm)	Error (mm)
-0.59	253	331	78
-0.24	231	255	24
0.21	49	154	105

CONCLUSIONS

The International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM) Regional Analysis of Frequency Tool (ICI-RAFT) was used to perform several types of rainfall analyses at three locations in Central and South America. The stations are UCH (Argentina), Condega (Nicaragua), and Station #1002 (Venezuela). Additional analyses were performed over regions including these three sites to determine a quantitative relationship between seasonal rainfall in any of these regions and one of several global climate indices.

Frequency analyses using rainfall data at each station helped to estimate a critical value of either the MJO5, MJO9 or the MJO10 for various lag times. These critical values provide an educated guess whether a particular season will experience greater than or less than normal precipitation. Results, together with the specific range of months studied and the lag time used, are summarized in Table 8. The final column of Table 8 reveals whether higher or lower values of the MJO lead to increased activity at each location. Table 9 illustrates these results further by providing estimates of the 20-year event for each station using all data, using only those years when the appropriate MJO index is less than the critical value in Table 8, and using only those years when the appropriate MJO index is greater than the critical value in Table 8. The differences in the results are substantial; for example, using the information in Tables 8 and 9, the 20-year exceedance rainfall event at Station 1002 in Northwest Venezuela between June and August is 39% (42%) less (greater) when the average MJO10 between May and July is greater (less) than -0.12. Tables 8 and 9 suggest that the MJO has a similar effect on rainfall at Condega in Nicaragua (where enhanced MJO activity near Australia or suppressed activity near Africa enhances rainfall) but has an opposite effect on rainfall in central Argentina (UCH) (where increased MJO activity near Africa enhances rainfall amounts). This shift in influence should be studied in more detail.

Table 8: The critical values of the MJO are given for each location during the season indicated and using the specified lag time between MJO and rainfall. The signs in the final column indicate MJO index values that tend to lead to greater rainfall.

Location	Season	Index	Lag (months)	Critical MJO
Station UCH, Argentina	Oct - Jan	MJO9	4	> 0.05
Station 1002, Venezuela	Jun - Aug	MJO10	1	< -0.12
Condega, Nicaragua	Aug - Oct	MJO5	3	< 0.205

Linear equations were also developed for regions that include the stations mentioned above and that relate the value of the MJO9 or MJO10 indices to rainfall. The final results of these analyses are shown in Table 10 for the seasons indicated in Table 8. The equations show strong correlations with the MJO with R^2 values of 0.65, 0.68, and 0.53, for Argentina, Nicaragua, and Venezuela, respectively.

Table 9: Magnitude of the 20-year event (mm) in each location using all data, only data from years when the appropriate MJO index was less than a critical value (Table 9), and only data from years when the appropriate MJO index was greater than a critical value (Table 9).

Location	All Years	< Crit. MJO	> Crit. MJO
Station UCH (mm)	462	414	563
Station 1002 (mm)	198	281	120
Condega (mm)	357	282	520

The analysis and results above demonstrate the effectiveness of using ICI-RAFT to quickly and efficiently determine rainfall intensities for events of various durations and frequencies for any season of the year. Lag times between rainfall events and global climate index averages can be easily incorporated in order to determine if rainfall is correlated to one of several indices included in the software. This feature can be especially useful when trying to predict whether the upcoming season will be wetter or drier than average.

Table 10: The slope (m), independent variable (x), x-intercept (b), and R^2, are given for the linear trends observed in terms of rainfall and hurricane activity in the locations listed.

Location	m	x	b	R^2
Argentina	205.93	M9	491.55	0.65
Venezuela	-221.34	M10	201.77	0.53
Nicaragua	-442.24	M9	496.27	0.68

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank members of the International Group at the International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM) at the Institute for Water Resources (USACE) for providing the funding for this project, including the development of ICI-RAFT. We would also like to thank all those responsible for providing the data from each country, in particular Mr. Francisco Guerrero of Nicaragua, who is the director of Aplicación Meteorológica of the Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER).

REFERENCES

Agosta, E. & R. Compagnucci. 2012. Central-West Argentina Summer Precipitation Variability and Atmospheric Teleconnections. J. Climate 25: 1657 – 1677.

Barnston, A. & R. Livezey. 1987. Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. Mon. Wea. Rev. 115: 1083 – 1126.

Bell, G. & J. Janowiak. 1995. Atmospheric circulation associated with the Midwest floods of 1993. Bull. Amer. Meteor Soc. 76: 681 – 695.

Bjerknes, J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon. Wea. Rev. 97: 163 – 172.

Giovannettone, J. & M. Wright. 2012. International Center for Integrated Water Resources Management Regional Analysis of Frequency Tool (ICI-RAFT), Institute for Water Resources, USACE.

Hosking, J. & J. Wallis. 1997. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. Cambridge University Press, UK. 244 pages.

Lorenz, E. 1951. Seasonal and irregular variations of the northern hemisphere sea-level pressure profile. J. Meteor. 8: 52 – 59.

Madden, R. & P. Julian. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J. Atmos. Sci. 28: 702 – 708.

Mantua, N., S. Hare, Y. Zhang, J. Wallace & R. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull. Amer. Meteor. Soc. 78: 1069 – 1079.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2009. Climate variability: Oceanic Niño Index. ClimateWatch Magazine, 1 page.

Pohl, B., Y. Richard & N. Fauchereau. 2007. Influence of the Madden-Julian Oscillation on southern African summer rainfall. J. Climate 20: 4227 – 4242.

Schwing, F., T. Murphree & P. Green. 2002. The Northern Oscillation Index (NOI): a new climate index for the northeast Pacific. Progress in Oceanography 53: 115-139.

Thompson, D. & J. Wallace. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. J. Climate 13: 1000 – 1016.

Trenberth, K. & J. Hurrell. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. Climate Dynamics 9: 303-319.

Walker, G. & E. Bliss. 1932.. World Weather V. Memoirs of the Royal Meteor. Soc. 4: 53 – 84.

Wallace, J. & D. Gutzler. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon. Wea. Rev. 109: 784 – 812.

Wheeler, M., H. Hendon, S. Cleland, H. Meinke & A. Donald. 2009. Impacts of the Madden-Julian Oscillation on Australian rainfall and circulation. J. Climate 22: 1482 – 1498.

Zhang, L., B. Wang & Q. Zeng. 2009. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in Southeast China. J. Climate 22: 201 – 216.

EFECTO DE LA ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CÁLCULO DE NIVELES DE AGUA Y CAUDALES

EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE ESTIMATION ON STAGE AND DISCHARGE CALCULATIONS

Mario Guallpa[1] y Rolando Célleri[1]

Resumen:
La calidad y precisión de los estudios hidrológicos depende principalmente de los datos y de los modelos hidrológicos utilizados. Sin embargo, muy poco se cuestiona la calidad de los datos y los efectos de ellos en los análisis posteriores. Al realizar el monitoreo hidrológico es común que se pierdan datos de presión atmosférica por fallas en los sensores y vandalismo, especialmente en zonas remotas, lo cual hace imposible calcular los caudales. Por ello, este estudio estuvo orientado a determinar el efecto de la estimación de datos de presión atmosférica sobre el cálculo del nivel de agua en pequeños cauces y cómo estos errores se propagan hacia la estimación de caudales. El estudio se realizó con datos registrados por sensores de presión de 18 estaciones hidrológicas y meteorológicas instalados en los observatorios eco-hidrológicos de Zhurucay y Soldados (ecosistemas de páramo, 3200 a 4200 m s.n.m.) y Mazar (bosque montano – 2600 a 3500 m s.n.m.), ubicados en el sur del Ecuador, desde junio de 2011 a diciembre de 2012. Los resultados revelaron que la regresión lineal más eficiente que la interpolación/extrapolación para estimar datos de presión atmosférica, al presentar valores del coeficientes de Nash – Sutcliffe mayores a 0,71, incluso para sensores ubicados hasta con 490 m de desnivel y separados hasta 4778 m. Los errores producidos sobre el cálculo de caudales fueron menores al 5 % del sesgo absoluto. Para calibrar la ecuación de regresión se analizaron períodos de 1 día a 4 meses (con registros de presión cada 5 minutos), encontrando que aún contar con un día de datos proporciona una buena ecuación de regresión. En conclusión, la pérdida de datos de presión puede ser estimada con bastante precisión para los fines de cálculo de caudales a partir de observaciones de otro sensor.
Palabras claves: Páramo, bosque montano, precisión de sensores, presión atmosférica, caudal, Ecuador.

Abstract:
The quality and precision of hydrological studies relies on the data and models used. However, data quality and its effect on subsequent studies are little questioned. Hydrological monitoring is a complex endeavour and it is common to have data gaps due to sensor malfunction or vandalism, especially in remote areas; these gaps make impossible to calculate the discharge. To tackle this problem, this study had the objective of determining the effect of atmospheric pressure estimation on river stage computation, and to know how stage errors propagate into discharge estimation. The study was conducted with data from 18 barometric pressure sensors from the ecohydrological observatories of Zhurucay and Soldados (páramo ecosystem, 3200 to 4200 m a.s.l.) and Mazar (montane forest, 2600 to 3500 m a.s.l.), located in South Ecuador. The study period extended from June 2011 to December 2012. Results revealed that linear regression was more efficient that interpolation to estimate atmospheric pressure data, reaching Nash-Sutcliffe coefficients higher that 0.71, even for sensors with 490 m of height difference and 4778 m apart. Discharge calculated with the estimated pressure data showed less than 5% of absolute bias when compared to the observed discharge. The length of the time series needed to obtain a good calibration of the regression equation was studied. Series from 1 day till 4 months (with 5-minute records) were used and it was found that even a single day of data provided a good regression equation. It is concluded that data gaps can be filled out satisfactorily for stage and discharge calculations from the observations of a nearby sensor.
Keywords: Páramo, montane forest, atmospheric pressure, discharge, Ecuador

INTRODUCCIÓN

La calidad y precisión de los estudios hidrológicos depende principalmente de los datos y de los modelos hidrológicos utilizados. Los modelos han sido mejorados permanente en las últimas décadas para reducir la incertidumbre en estudios hidrológicos, lo que se evidencia en el amplio desarrollo de modelos de distinto grado de complejidad (Liu et al, 2009; Pao-Shan Yu et al, 2001), como por ejemplo la modelación de la escorrentía total de las cuencas hidrográficas (Cuartas et al., 2012; Amaya et al, 2009). Sin embargo, los modelos pueden llegar únicamente a ser tan precisos como lo son los datos de ingre-

[1] Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
E-mail: mario.x.guallpa@gmail.com

Recibido: 28/09/2013
Aceptado: 29/11/2013

so utilizados en los estudios. Si bien la integridad de los datos hidrológicos depende de muchos aspectos como validez de las curvas de descarga, sistema de captura de datos, precisión de los sensores, entre otros (WMO, 2008), en los estudios hidrológicos muy poco se cuestiona la calidad de los datos utilizados en los estudios y se tiene la concepción de que son exactos y representan la realidad absoluta de la zona de estudio (Célleri y Feyen, 2009).

Para estimar los caudales en cauces pequeños de microcuencas experimentales se usan sensores electrónicos que miden el nivel del agua, generalmente transductores de presión (Crespo et al, 2011). Existen dos tipos de transductores, de compensación automática (tubo ventilado) y los que no tienen compensación automática. En los transductores de tubo ventilado, se utiliza un sensor sumergido al que está adherido un tubo por el cual entra aire desde la parte externa; esta presión del aire contrarresta a la presión generada sobre el sensor sumergido (presión de columna de aire y agua), registrando directamente la presión de la columna de agua sobre el sensor (Gribovszki et al, 2013; INW manual, 2011). Por otro lado, en los casos cuando no hay compensación automática, un sensor se coloca en el lecho del río para medir la presión absoluta (i.e. la columna de agua más la columna de aire sobre el sensor) mientras que otro sensor se coloca fuera del lecho del río para medir la presión atmosférica sobre el agua (i.e. columna de aire). La compensación consiste en la sustracción del valor de la presión atmosférica de la presión absoluta. De esta manera se puede estimar el nivel de agua y posteriormente el caudal que pasa por el vertedero.

Como la presión atmosférica es la medida del peso de la columna de aire que se encuentra sobre un sitio determinado, ésta varía inversamente con la altitud. Pero la presión atmosférica, además de la altitud, depende de muchas otras variables como la situación geográfica, la temperatura, la humedad y las condiciones meteorológicas (Whiteman, 2000). Al estar los sensores prácticamente en la misma ubicación geográfica, el efecto de las condiciones meteorológicas sobre la presión atmosférica son similares, y por efectos de los métodos usados para estimar la presión atmosférica, en este documento solo se analiza la relación de la presión atmosférica con variación de la altura. La relación entre la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento con la presión atmosférica se analizará con más detalle y profundidad en futuros estudios, en los que se caracterizará las variables meteorológicas para ecosistemas de páramo y bosque montano en los andes del Ecuador.

En la costa, la columna de aire es mayor que en una zona de montaña, por lo que la presión del aire es menor en zonas altas (Célleri et al, 2012b). Al aumentar la temperatura disminuye la densidad del aire, haciendo que el peso de la columna de aire se reduzca, disminuyendo también la presión atmosférica (WMO, 2008); sin embargo no existe una relación clara y constante entre estas dos variables (Eslava, 1991). En los Andes tropicales existen cambios bruscos del tiempo, los cuales producen una alta variabilidad espacio-temporal de las variables meteorológicas. Por ejemplo el rango de variación de la presión atmosférica cambia hasta más 5 cm en pocas horas, razón por la cual el registro de datos debe tener una alta frecuencia de toma de datos (5 min para nuestro caso) y un período de monitoreo suficientemente largo para que la correlación entre una estación y otra sea significativa. Si a esta situación se adiciona que los barómetros electrónicos tienen un determinado tiempo de respuesta, se tiene como resultado que las mediciones de presión atmosférica pueden tener una alta incertidumbre en pequeñas escalas temporales.

Según información recolectada en el monitoreo hidrológico de cuencas de páramo y bosque andinos, así como ensayos realizados en oficina, se encuentra que los problemas más comunes relacionados con la estimación de caudales son (i) que los niveles de agua registrados por los sensores de medición de nivel presentan desfases de hasta 7 cm con respecto al nivel real y un ruido considerable en el registro de los datos (Ochoa et al, 2013); estos desfases se producen por un error del sensor al momento de medir la presión atmosférica y (ii) la pérdida de datos de presión debido a problemas de funcionamiento o mantenimiento (e.g. baterías descargadas) del sensor y por vandalismo (e.g. robo del sensor externo). Estos problemas ocasionan grandes errores al momento de estimar los caudales o simplemente que no se los pueda estimar, por lo que no se puede realizar el cierre del balance hidrológico.

Las 2 técnicas más comunes para estimar la presión atmosférica son mediante regresiones lineales directas e interpolación y extrapolación lineal. El método de regresión lineal tiene la ventaja de no depender de la altura a la que están instalados los sensores y solo necesita datos de un sensor para estimar presiones de otro sensor; se basa en la correlación lineal entre los datos de presión atmosférica y se determina una ecuación con la que se estima los datos faltantes. El método de interpolación y extrapolación lineal depende fuertemente de la altura sobre el nivel del mar a la que están instalados los sensores, y se necesitan datos de 2 sensores para extrapolar datos de un tercer sensor. Todavía no se evidencian estudios que comparen estos métodos para estimar la presión atmosférica.

Es de suma importancia realizar el control de calidad de datos de las presiones atmosféricas registradas por sensores automáticos, debido a que no son estables en el tiempo y la precisión del registro tiene una gran incertidumbre. Además, el caudal estimado que sale de una cuenca hidrográfica depende directamente de los registros de estos transductores

de presión. Si no se controlan las observaciones de presión atmosférica, los caudales calculados serán erróneos y por lo tanto las conclusiones que se obtengan de modelos, procesos y estudios hidrológicos no representarían la realidad del ecosistema estudiado. Sin duda, el primer paso para realizar un verdadero y eficaz estudio de los recursos hídricos es un adecuado monitoreo y un excelente control de datos generados, para en base a ello, se pueda obtener resultados correctos y tomar decisiones acertadas sobre la gestión integral de los recursos hídricos.

Si bien estos problemas son recurrentes, no se han encontrado estudios que documenten el efecto de la calidad de los datos de presión sobre el cálculo de caudales. El presente estudio analiza el efecto de la estimación de datos de presiones atmosféricas sobre el cálculo de niveles de agua y el efecto de éstos sobre la estimación de caudales. Como parte del estudio se analizaron los métodos de regresión lineal e interpolación y extrapolación lineal para la estimación de la presión atmosférica faltante.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó con datos de los observatorios ecohidrológicos de Zhurucay y Soldados (ecosistemas de páramos), y Mazar (bosque montano). El río Zhurucay está ubicado al Sur del Ecuador en la parte occidental de los Andes, aproximadamente a 85 km al suroeste de la ciudad de Cuenca y es afluente del río Jubones que desemboca en el océano Pacífico. La cuenca alta del río Zhurucay (zona de estudio) tiene un área de drenaje de 7,97 km^2 y un rango altitudinal entre 3400 y 3900 m s.n.m. La red de monitoreo del observatorio consta de 2 estaciones meteorológicas, 10 estaciones hidrológicas anidadas (Tabla 1), 7 pluviógrafos, 1 disdrómetro laser, 1 radiómetro neto, TDRs y tensiómetros. Cada estación hidrológica consta de un vertedero de cresta delgada y de dos sensores transductores de presión que registran presiones atmosféricas absolutas para obtener el nivel de agua sobre el vertedero. La presión atmosférica promedio mensual registrada por los barómetros de las estaciones meteorológicas (ubicadas a diferentes alturas) varía de 700 cmH2O a 651 cmH2O.

Tabla 1. Estaciones hidrológicas y meteorológicas instaladas en los tres observatorios ecohidrológicos utilizados en el estudio.

Observatorio	Estación	Tipo	Coordenadas		Altura m s.n.m.
			UTM X	UTM Y	
Zhurucay	Vertedero 1	Estación Hidrológica	696736	9661710	3777
	Vertedero 2	Estación Hidrológica	696472	9661714	3770
	Vertedero 3	Estación Hidrológica	696156	9661244	3732
	Vertedero 4	Estación Hidrológica	696173	9661194	3729
	Vertedero 5	Estación Hidrológica	695399	9660221	3767
	Vertedero 6	Estación Hidrológica	695778	9659800	3645
	Vertedero 7	Estación Hidrológica	696508	9659910	3680
	Vertedero 8	Estación Hidrológica	696668	9659678	3673
	Vertedero 9	Estación Hidrológica	696374	9658770	3495
	Vertedero 10	Estación Hidrológica	696515	9660616	3696
	Estación Base	Estación Meteorológica	696439	9661707	3780
	Estación Principal	Estación Meteorológica	697202	9656990	3290
Soldados	Vertedero1	Estación Hidrológica	68778	9673747	3750
	Vertedero 2	Estación Hidrológica	69004	9673270	3760
	Vertedero 3	Estación Hidrológica	68818	9669424	3613
	Vertedero 4	Estación Hidrológica	694043	9677048	3759
Mazar	Vertedero 1	Estación Hidrológica	757963	971806	2703
	Vertedero 2	Estación Hidrológica	756845	971795	2864
	Vertedero 3	Estación Hidrológica	756212	971798	2841
	Vertedero 4	Estación Hidrológica	755086	971876	2952
	Hacienda La Libertad	Estación Meteorológica	756133	971857	2915

El observatorio de Soldados está constituido por cuatro microcuencas que forman parte de la subcuenca del río Soldados, que es afluente del río Paute y desemboca en el Océano Atlántico, las mismas que se encuentran al suroeste del Ecuador, cerca del Parque Nacional Cajas al occidente de la ciudad de Cuenca, y en un rango altitudinal entre 3200 y 4200 m s.n.m. En cada microcuenca se instaló una estación hidrológica que consta de un vertedero y transductores de presión (Tabla 1).

El observatorio de Mazar se encuentra en la estribación sur del Parque Nacional Sangay, situado en el lado oriental de la cordillera de los Andes, al suroeste del Ecuador. Las tres microcuencas estudiadas son parte de la cuenca del río Mazar, afluente del río Paute que desemboca en el Océano Atlántico. La cuenca se extiende desde los 2600 hasta 3500 m s.n.m. (Thompson, 2012). Las microcuencas monitoreadas igualmente se equiparon con vertederos y transductores de presión.

SENSORES Y DATOS

Este estudio se realizó con los datos de 10 estaciones hidrológicas instaladas en el observatorio de Zhurucay y 4 estaciones hidrológicas en cada uno de los observatorios de Soldados y Mazar. Los datos corresponden al periodo junio de 2011 a diciembre de 2012. Para la obtención de los niveles de agua, cada estación hidrológica cuenta con dos sensores de presión diseñados para medir la presión absoluta. Además de medir las presiones absolutas, los sensores tienen incorporado un sensor de temperatura, que se usa para compensar al sensor de presión. Para tener una referencia de la presión atmosférica, en los observatorios de Zhurucay y Mazar se utiliza también el barómetro de la marca Vaisala (modelo CS106) instalado en las estaciones meteorológicas Campbell Scientific.

Para medir el caudal que circula por el cauce de la quebrada, cada estación hidrológica consta de un vertedero compuesto por una sección triangular y una sección rectangular. El objetivo de utilizar vertederos combinados es para poder medir con mayor precisión tanto los caudales bajos (sección triangular) como los caudales extremos (sección compuesta) (Célleri et al, 2012a). Para estimar el caudal a partir de los niveles de agua registrados por los sensores de presión, se utiliza la ecuación formulada por Bergamann (1963). La ecuación (1) es válida para un vertedero compuesto por una sección triangular con un ángulo de 90° en el vértice y una sección rectangular sin contracciones laterales, además que la lámina de agua que pasa sobre el vertedero debe ser libre (aireado).

$$Q = \left(1.37 * \left(h^{5/2} - (h - H)^{5/2} \right) + \left(1.77 * B * (h - H) \right)^{3/2} \right) \quad (1)$$

En la ecuación propuesta por Bergamann (1963): *Q* es el caudal expresado en m^3/s, *h* es la altura de agua (metros) desde la platina del vertedero, *H* es la altura (metros) de la sección triangular, y *B* es la longitud (metros) combinada de las porciones horizontales del vertedero compuesto.

Para medir la altura sobre el nivel del mar de las estaciones hidrológicas se utilizó un altímetro marca Techtrail, el mismo que funciona como un barómetro de alta precisión y mediante relaciones de altura-presión obtiene la altura de un sitio determinado (Techtrail manual, 2010). Para obtener las coordenadas (UTM) de las estaciones se utilizó un GPS marca Garmin (Gamin manual, 2010).

ESTIMACIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Para estimar los datos de presión atmosférica se utilizaron dos métodos: la regresión lineal y la interpolación o extrapolación lineal.

Regresión lineal

Al ser la presión atmosférica una variable continua en el tiempo y ser función de la altura sobre el nivel del mar (Whiteman, 2000; Eslava, 1991; Ven Te Chow, 1996), se plantea como primera opción para la estimación de la presión atmosférica, la regresión lineal entre los datos de los barómetros de diferentes estaciones hidrológicas (e.g. Soldados), o entre los barómetros de una estación meteorológica cercana y una estación hidrológica (e.g. Zhurucay y Mazar). Si bien se conoce que la presión es una función exponencial de la altura, para pequeñas diferencias de presión entre estaciones (máxima diferencia 40 cmH_2O) se asume que la presión varía linealmente. Para esto la serie de datos se divide en tres periodos: dos periodos de tiempo con datos completos para calibrar y validar la ecuación lineal y un tercer periodo que tiene problemas de datos y en el cual se aplicará el método de estimación o relleno (ver Figura 1). Para cada caso de estudio se tomó un periodo de datos de 4 meses con una frecuencia de 5 minutos (35136 datos) tanto para la calibración como para la validación de la ecuación de regresión lineal. El periodo común de datos fue diferente para cada estación, ya que éste depende de la calidad de datos que se tenga de cada sensor. En la ecuación (2) se muestra la ecuación lineal en la que Y_i es la presión estimada, X_i es la presión observada, y *a* y *b* son los coeficientes de la regresión.

$$Y_i = a + bX_i \quad (2)$$

Para medir la bondad de ajuste entre las series correlacionadas se usa el coeficiente de determinación R^2 y el criterio de la pendiente de la recta. Para validar la ecuación lineal se utiliza el coeficiente de Nash-Sutcliffe (E_{NS}), que indica la eficiencia del método uti-

lizado para estimar la presión atmosférica (Nash and Sutcliffe, 1970), y el coeficiente de determinación R^2. Para determinar el error entre los datos generados por la ecuación lineal respecto a los datos reales observados por los barómetros, se utiliza el sesgo residual (bias) y el sesgo absoluto (Abs bias) (Tabla 2). Los índices bias, Abs bias, R^2 y E_{NS}, en general, se usan para determinar el error, la calibración, validación y rendimiento de modelos hidrológicos (Vázquez y Feyen, 2002; Wang et al, 2009).

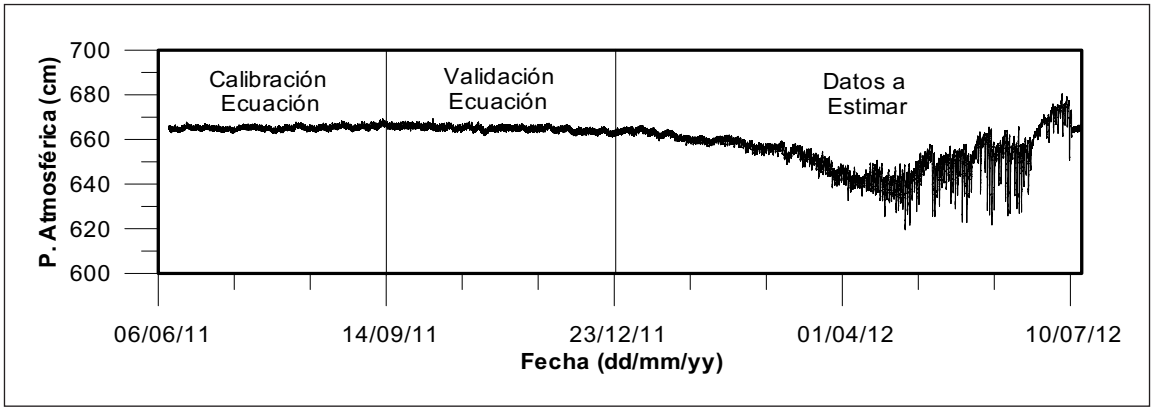


Figura 1. Datos de presión atmosférica del vertedero 2 del observatorio de Soldados (3760 m s.n.m.) divididos en los periodos de tiempo utilizados para calibrar y validar la ecuación y el periodo de datos no confiables que deben ser estimados.

Tabla 2. Criterios estadísticos usados en el estudio. X = datos estimados, Y = datos observados.

Sesgo residual	**Sesgo absoluto**
$bias = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)}{n}$	$Abs.bias = \frac{\sum_{i=1}^{n}\lVert X_i - Y_i \rVert}{n}$
Coeficiente de Determinación	**Coeficiente de Nash – Sutcliffe**
$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \bar{Y}\right)\left(X_i - \bar{X}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \bar{Y}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X}\right)^2}} \right)^2$	$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \bar{Y}\right)^2}$

La FAO (2006) recomienda que el valor de R^2 de la regresión sea mayor a 0,7 y que la pendiente de la recta (ecuación 2) esté dentro del rango 0,7 < b > 1,3, lo que indica buenas condiciones de los datos y la suficiente homogeneidad como para sustituir los datos que faltan en la serie incompleta. De manera similar el coeficiente de Nash – Sutcliffe (E_{NS}) indica cuán eficiente es la ecuación de regresión lineal; su valor oscila entre –∞ y 1, siendo 1 el valor óptimo (Nash y Sutcliffe, 1970). A pesar de la bondad de ajuste del R^2, el coeficiente de E_{NS} es más sensible al ajuste (Vázquez y Feyen, 2002). Además para las correlaciones entre presiones atmosféricas, en el periodo de validación, se utiliza el valor *p* como índice de significancia estadística. El valor *p* indica la probabilidad de que un resultado sea debido al azar, es decir cuando menor sea el valor de p, más significativo será el resultado. El sesgo residual (bias) es similar al error medio, indica en manera de promedio, si el método de relleno está sobrestimando o subestimando las lecturas. El resultado del bias puede ser cero, pero ese valor no indica que las series de datos

sean iguales, ya que los valores positivos y negativos se pueden compensar. Para evitar este error se introduce el sesgo absoluto (Abs bias). Este parámetro indica cuán alejadas están las series de datos sin importar si las observaciones sean positivas o negativas. Los errores cuantificados por los índices estadísticos se comparan con las especificaciones técnicas (precisión de 5 mm) de los sensores para determinar si los métodos de rellenos son óptimos o no.

Interpolación/extrapolación lineal

A partir de los datos completos (sin vacíos) de dos barómetros y de las respectivas alturas en las cuales se encuentran, se puede interpolar o extrapolar las presiones para una tercera estación. La interpolación y/o extrapolación está fuertemente condicionada por la exactitud en la determinación de la altitud del sitio de ubicación de los sensores, ya que errores en las diferencias de alturas entre los vertederos provocará errores en la estimación de la presión atmosférica. La ecuación (3) se utiliza para realizar la interpolación, donde P_{3i} es la presión estimada (cm) a partir de las presiones observadas P_{1i} y P_{2i}, y H_1, H_2 y H_3 son las alturas de las tres estaciones (m s.n.m.). Otra ecuación similar se usa para la extrapolación. Para aplicar este método es necesario que las 3 series de tiempo tengan datos coincidentes en un mismo periodo de tiempo. Esta serie se divide en 2 periodos, uno para calibrar y validar la ecuación (al comparar datos estimados con observados) y el otro donde es necesario estimar los datos.

$$P_{3i} = P_{2i} - \frac{(H_2 - H_3)(P_{2i} - P_{1i})}{(H_2 - H_1)} \qquad (3)$$

Para comparar la eficiencia de los 2 métodos de estimación, los periodos de datos de calibración, validación y estimación fueron los mismos para los 2 métodos. Los índices estadísticos utilizados en el método de la regresión lineal también fueron utilizados para este método.

Finalmente, para el mejor método de estimación se analizó la sensibilidad del número de datos necesarios para calibrar la ecuación lineal, y se determinó cómo esto afecta la eficiencia en la estimación de la presión atmosférica para el periodo de validación de la ecuación, que en general es de 4 meses (35136 datos) para los tres observatorios. Para ello se obtuvieron ecuaciones para periodos de calibración de 4, 3, 2, 1 meses y 1 día. Estas ecuaciones se utilizaron para estimar los datos en el periodo de validación (4 meses), calculándose en cada caso la eficiencia y el error.

EFECTO DE LA ESTIMACIÓN DE DATOS DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL CÁLCULO DE CAUDALES

Para este estudio se emplearon los datos del periodo de validación de las ecuaciones. El caudal se calculó con la ecuación del vertedero (ecuación (1)), en función de la altura de agua estimada a partir de la compensación de datos de presión. La compensación se realizó con los datos de presión observados y con los estimados, con los que se obtuvo una serie de caudales observados y una de caudales estimados. Para determinar el error introducido por la presión estimada sobre el cálculo del caudal se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y el sesgo absoluto como porcentaje (%Abs bias). El R^2 se utilizó para determinar la correlación entre los caudales observados y los caudales estimados, y el %Abs bias para cuantificar el error absoluto entre las dos series de caudales. De igual forma que en la estimación de la presión atmosférica, para determinar si el resultado de las correlaciones entre caudales es estadísticamente significativo se calculó el valor *p.* Para no tener un criterio sesgado del efecto de la estimación de la presión sobre el cálculo del nivel de agua y caudal, se adopta los rangos de aceptabilidad para el %Abs bias propuestos por Tokay et al, (2010), ver Tabla 3.

Tabla 3. Criterio de calificación del desempeño del método según el índice de porcentaje de sesgo absoluto (%Abs bias) (Tokay et al, 2010), para comparación entre serie de datos de caudales estimados y observados.

%Abs bias	Desempeño
< 5	Excelente
5 – 10	Muy bueno
10 – 15	Bueno
15 – 20	Razonable
> 20	Mal

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se había planteado en el estudio, la presión atmosférica varía linealmente con la altura en el rango altitudinal estudiado (Figura 2b). En el observatorio de Zhurucay se encontró un R^2=0,99 y la pendiente de la línea de regresión fue de -0.08 cm/m, valor que se asemeja a la gradiente de la presión dada por la WMO (2008*)* de -0,1 cm/m. Para el observatorio de Soldados la gradiente de la presión fue de -0,077 cm/m con un R^2 de 0,99 y para el observatorio de Mazar la gradiente fue de -0,095 cm/m con un R^2 =0,97.

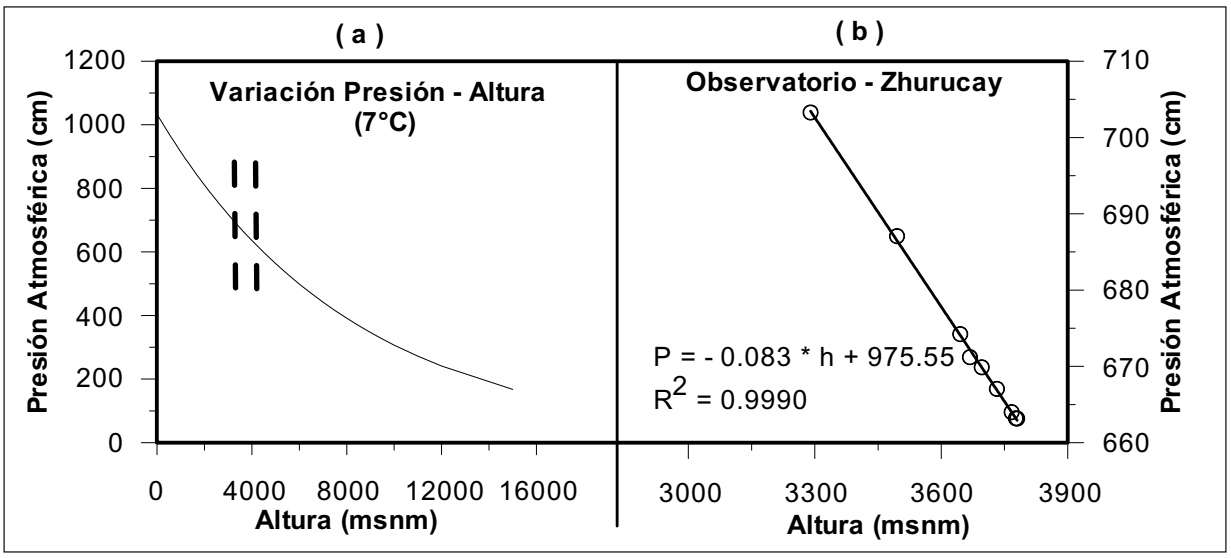


Figura 2. (a) variación teórica de la presión atmosférica respecto a la altura a 7°C. Las líneas entrecortadas representan el intervalo de altura en que están instalados los sensores de presión en el observatorio de Zhurucay (3000 – 4000 m s.n.m.). (b) variación de la presión atmosférica media respecto a la altura registrada por los sensores instalados en el observatorio (círculos) y la línea de tendencia que sigue la presión.

Estimación de la presión atmosférica

En el observatorio de Zhurucay se obtuvo buenos resultados tanto en la calibración como en la validación de la ecuación de regresión lineal (Tabla 4), alcanzando un R^2 que varía entre 0,86 y 0,98 para la calibración y de 0,81 a 0,96 para la validación de la ecuación, coeficientes que están dentro del rango recomendado por la FAO (2006). De igual forma, la pendiente de la ecuación de regresión lineal varía entre 0,91 y 1,13, valores que están dentro del rango de 0,7 a 1,3 (FAO, 2006). Esto indica que se tienen buenas condiciones y suficiente homogeneidad para estimar o rellenar los datos que faltan en la serie incompleta. Las ecuaciones lineales utilizadas para el relleno tuvieron una alta eficiencia de acuerdo al coeficiente de Nash-Sutcliffe (E_{NS}). Se determinaron valores de E_{NS} entre 0,72 y 0,96 (Tabla 4), y para todos los casos el valor p fue menor a 0,01 y por lo tanto se tiene una confianza del 99% sobre la correlación de las variables. Los errores de la presión atmosférica calculados con el Abs bias y bias, de las ecuaciones lineales respecto a los valores reales de observación, están dentro del rango de precisión de los barómetros dados por el fabricante (0,5 cm) (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados estadísticos de la validación de las ecuaciones de regresión lineal para la estimación de datos de presión atmosférica en el observatorio de Zhurucay.

Estaciones	Altura (m s.n.m.)	Calibración		Validación				
		b	R2	R2	1 - p value	E_{NS}	Abs bias (cm)	bias (cm)
Meteo. Principal	3780	-	-	-		-	-	-
Vertedero 1	3777	1.08	0.9097	0.9322	1,00	0.8561	0.31	0.26
Vertedero 5	3767	1.02	0.9572	0.9324	1,00	0.7219	0.42	0.41
Vertedero 3	3732	1.04	0.9654	0.9575	1,00	0.9496	0.17	-0.06
Vertedero 10	3696	0.91	0.947	0.9209	1,00	0.864	0.27	0.2
Vertedero 7	3680	0.97	0.8596	0.8083	1,00	0.7537	0.41	0.22
Vertedero 6	3645	1.04	0.9659	0.9698	1,00	0.9592	0.19	0.1
Vertedero 9	3495	1.13	0.9233	0.8985	1,00	0.8967	0.29	0.01
Meteo. Base	3290	1.04	0.9788	0.9492	1,00	0.9648	0.17	0.024

En la zona de estudio de Soldados, la regresión lineal se realizó entre los registros de los sensores de presión de las estaciones hidrológicas. Al igual que en la zona de Zhurucay los resultados son buenos en la calibración y validación de la ecuación de regresión lineal. Se encontraron valores de R^2 superiores a 0,9 y pendientes entre 0,89 y 1,02. Además los errores promedios fueron menores a 0,5 cm, que es la precisión de los barómetros. Se obtuvieron eficiencias E_{NS} entre 0,8 y 0,9.

En el observatorio de Mazar, las regresiones lineales se realizaron respecto a los registros de presión atmosférica del barómetro instalado en la estación meteorológica. En Mazar los datos de presión atmosférica presentan mucho mayor ruido que en los otros dos observatorios y los sensores se dañan con mayor frecuencia. De todas maneras, incluso en este caso los coeficientes de determinación variaron entre 0,71 y 0,86, con pendientes de las ecuaciones de calibración entre 0,98 y 1,07. Las eficiencias (E_{NS}) de las ecuaciones de regresión estuvieron entre 0,62 y 0,82. Sin embargo los errores producidos no están tan alejados de rango de precisión, con Abs bias entre 0,56 y 0,77 cm.

Se encontró además que no existe una correlación entre los coeficientes de determinación y la altura y distancia entre los sensores analizados. Para cualquier diferencia de altura y distancia entre sensores, los coeficientes de determinación fueron altos (R^2 > 0,7). La mejor regresión lineal se encontró entre las estaciones meteorológicas de Zhurucay (Figura 3b), entre las cuales existe la mayor diferencia de altura (490 m) y distancia (4778 m). En síntesis, se puede concluir que la eficiencia de la regresión lineal es alta, lo cual se debe a que la presión atmosférica varia en forma similar (forma sinusoidal, Eslava, 1991) en cada observatorio estudiado, aunque las magnitudes de la presión sean diferentes entre los sensores (Figura 3a).

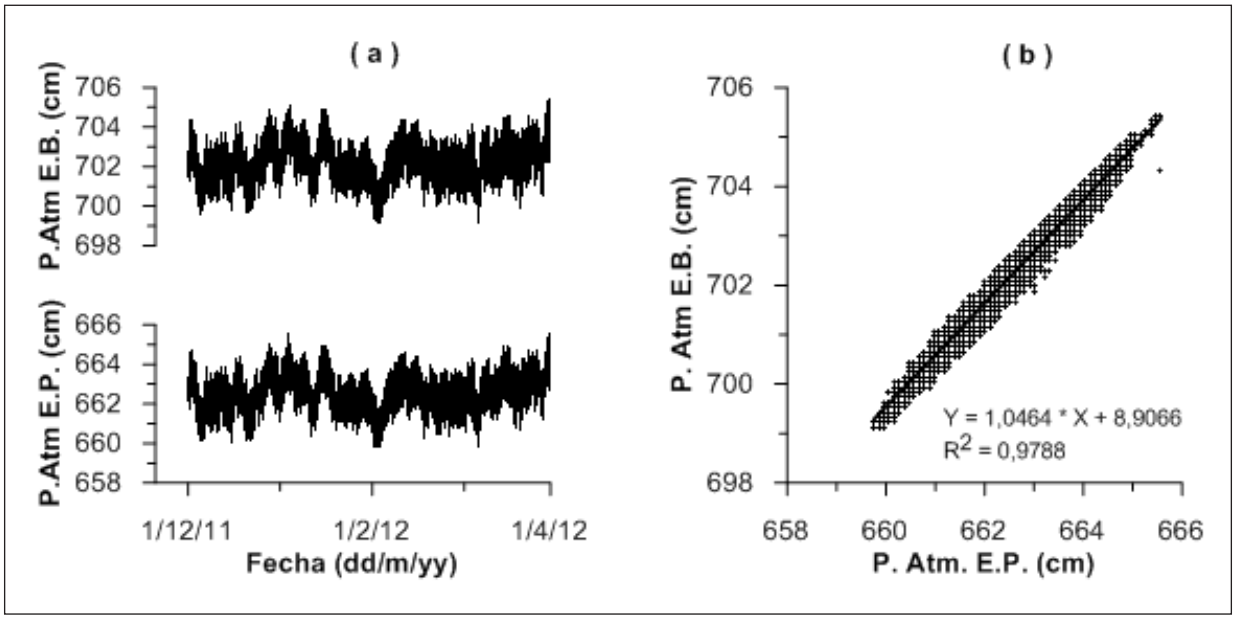


Figura 3. Regresión lineal entre los datos registrados por el barómetro de la estación principal y de la estación base, (a) variación de las presiones atmosférica registradas por los barómetros de las estaciones meteorológicas. (b) gráfica de dispersión entre los datos.

El método de interpolación/extrapolación dio resultados de inferior eficiencia en comparación con el método de regresión lineal. Para las zonas de estudio de Zhurucay y Mazar, si bien los coeficientes de determinación son buenos (R^2>0,811 para Zhurucay y R^2>0,71 para Mazar), los errores medios entre las presiones observadas y estimadas fueron altos (entre 2,5 y 4,4 cm en Zhurucay y 5,4 cm en Mazar) y los coeficientes de eficiencia (E_{NS}) resultaron negativos en la mayoría de los casos. La principal causa para que las interpolaciones y extrapolaciones sean ineficientes es que la variación de la presión con la altura no es perfectamente lineal y si bien cuando hay pequeños desniveles la relación es muy cercana a la lineal (demostrada por buenos valores de R^2), las variaciones son suficientemente fuertes para ocasionar alto error y un bajo E_{NS}. Esto último incluso puede darse simplemente por no poder medir con precisión las elevaciones a las que se encuentran los sensores. Un ejemplo de interpolación se muestra en la Figura 4. Se observa que la presión interpolada sobrestima los valores, obteniendo un bias 2,07 cm. A pesar de existir una buena correlación entre los datos observados y estimados, la eficiencia es baja. Como se puede ver en la Figura 4b, la variación de la presión de las dos series es similar

pero se encuentra desfasada 2,07 cm hacia arriba; el problema se da porque probablemente la altura a la que está el sensor (vertedero 10) no fue medida correctamente.

También se encontró que no existe una buena relación entre E_{NS} y la altura o distancia a la estación a ser interpolada. La más baja eficiencia de interpolación se dió entre las estaciones que tienen menor diferencia de altura (3 m) y distancia (200 m), con un E_{NS} = -0,88. Por el contrario para una diferencia de altura (490 m) y distancia (4778 m) mayores el E_{NS} fue de 0,64; para las demás variaciones de distancia y altura el R^2 y E_{NS} no sigue una tendencia definida. Con lo anterior se sostiene más aún que para el método de interpolación y extrapolación lineal depende de una correcta estimación de la altura de las estaciones y la buena calidad de los datos con los que se va a interpolar.

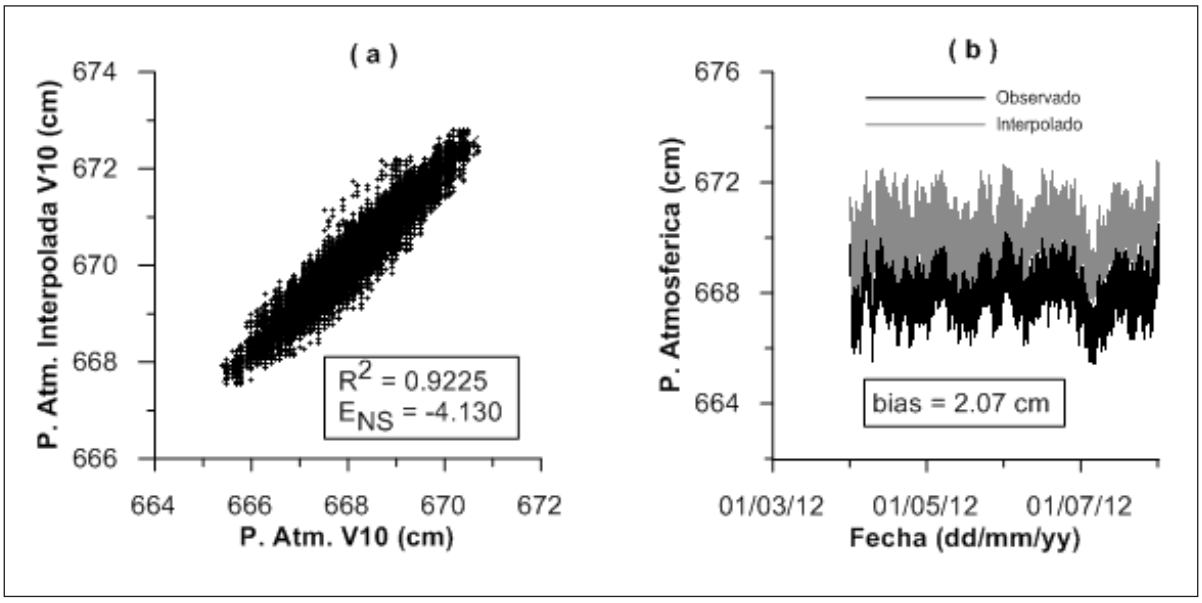


Figura 4. Estimación por interpolación de la presión atmosférica de la estación hidrológica 10 del observatorio de Zhurucay. Ecosistema de páramo – 3696m s.n.m. (a) Correlación lineal entre la presión atmosférica observada por el sensor y estimada mediante interpolación. (b) Error entre las presiones observadas y estimadas.

Para el caso de Soldados, al estar las tres estaciones hidrológicas prácticamente a la misma altura (10 m) y tener datos de buena calidad, los resultados de interpolación y extrapolación son buenos. Los coeficientes de determinación (R^2) están alrededor de 0,92, el coeficiente de Nash-Sutcliffe está entre 0,7 y 0,9 y los errores entre la presión estimada y observada alrededor de 0,5 cm.

De este análisis se concluye que el método de regresión lineal es mejor que el de interpolación/extrapolación y que además de los buenos resultados, la facilidad de aplicación para la estimación y relleno de datos de la presión atmosférica lo vuelven muy atractivo.

Efecto de la estimación de la presión atmosférica sobre el caudal

Los caudales calculados a partir de la presión atmosférica estimada mediante regresiones lineales mostraron errores relativamente bajos. Los errores medios del caudal calculado con la presión atmosférica estimada respecto a la observada resultaron menores al 5% en 16 de los 18 casos analizados, lo cual los ubica dentro del rango de estimación excelente según el criterio adoptado (Tabla 5). De igual forma las correlaciones lineales medidas con el coeficiente de determinación (R^2), entre los caudales observados y los caudales estimados son altas, llegando prácticamente a ser 1, y con un valor de p menor a 0,01 para todos los casos. Por otra parte, el error relativo en caudales acumulados no supera el 5%. Estos resultados corroboran la excelente precisión alcanzada para los caudales estimados. Únicamente en 2 vertederos de Mazar (vertederos 2 y 4), el %Abs bias superó el 10%, lo cual ubica a la estimación dentro del rango calificado como bueno. Sin embargo, aún en este caso el error en los caudales acumulados es menor al 5%, por lo que su impacto en estudios de balance hídrológico será aceptable.

Tabla 5. Resultados estadísticos del error en el cálculo de caudales debido a la estimación de la presión atmosférica mediante regresiones lineales. Observatorio de Zhurucay.

Estaciones	Altura (m s.n.m.)	Validación					
		R2	1 - p value	Abs bias (cm)	Abs bias (%)	bias (l/s)	% Error Acumulado
Meteo. Principal	3780	-		-	-	-	-
Vertedero 1	3777	0.9961	1,00	0.43	6.32	-0.3	-5.02
Vertedero 5	3767	0.9987	1,00	1.07	4.37	-0.86	-4.05
Vertedero 3	3732	0.998	1,00	0.36	2.71	0.11	0.99
Vertedero 10	3696	0.9987	1,00	0.97	2.75	-0.53	-1.78
Vertedero 7	3680	0.9963	1,00	5.36	4.62	3.32	3.43
Vertedero 6	3645	0.9997	1,00	0.23	2.72	-0.17	-2.22
Vertedero 9	3495	0.9964	1,00	11.25	4.45	-1.04	-0.41
Meteo. Base	3290	-		-	-	-	-

Por otro lado, los caudales calculados a partir del uso de la extrapolación lineal para estimar la presión atmosférica muestran resultados distintos en los 3 observatorios. En el observatorio de Soldados los errores en la estimación de los caudales son mínimos, siendo inferiores al 5% en las 4 estaciones hidrológicas. Esto se da porque todos los vertederos están prácticamente a la misma altura sobre el nivel del mar, con una diferencia menor a 10 m entre estaciones. Sin embargo, en los observatorios de Zhurucay y Mazar el error en la estimación de los caudales es alto, llegando a obtener un %Abs bias de hasta 30% en Zhurucay y 86% en Mazar, lo que los ubica en el rango de pésimos según los rangos de desempeño adoptados (Tabla 3). Esto sugiere que el método de interpolación y extrapolación lineal de presiones atmosféricas, no es aplicable para el relleno de datos. La Figura 5 muestra los grandes errores encontrados en los caudales acumulados, a diferencia del método de regresión lineal para el cual el error es mínimo (-1,78%).

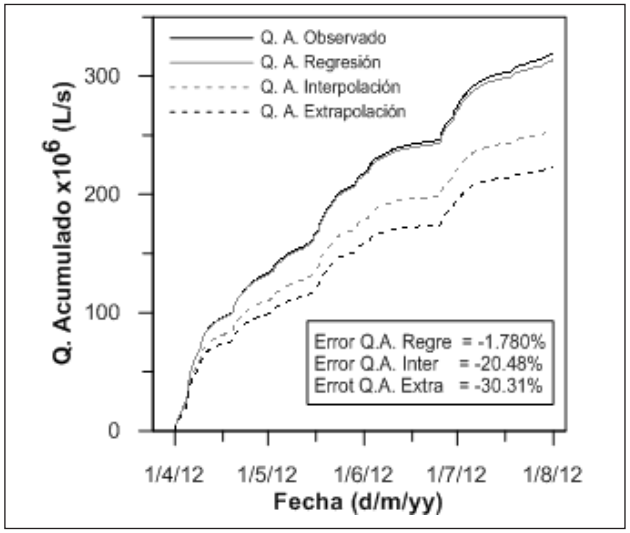


Figura 5. Caudales acumulados observados y calculados a partir de diferentes métodos de estimación de la presión atmosférica. Vertedero 10 – Zhurucay, 3696 m s.n.m.

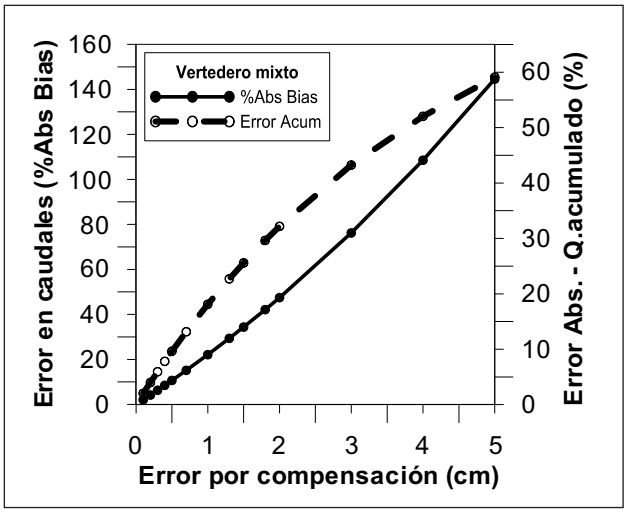


Figura 6. Análisis de sensibilidad del error en el caudal producido por el error en la estimación de la presión atmosférica. Vertedero compuesto 01 de Zhurucay para datos de 2012.

Por otro lado, en un análisis realizado para el vertedero compuesto número 1 del observatorio de Zhurucay con datos del año 2012, se introdujo un error de 0,5 cm (precisión de los sensores) a las mediciones del nivel de agua durante toda la serie de tiempo (i.e. año hidrológico). Como resultados se obtuvo un error medio anual del caudal del 10% (%Abs bias) y un error relativo acumulado del -9.64%. La figura 6 muestra el resultado de un análisis de sensibilidad del error en el cálculo del caudal respecto al error en la estimación de la presión atmosférica. Se observa que el error en el caudal (medido con el %Abs bias) crece de manera exponencial respecto al error producido en la estimación de la presión atmosférica (desfase en cm), y el error absoluto en volumen de caudal acumulado de manera logarítmica. Si se toma como referencia que un error de 10 % de sesgo absoluto es muy bueno según el criterio de la tabla 3, a partir de un error superior a 0,5 cm en la estimación de la presión atmosférica el error en el caudal

se hace significativo (Figura 6). Es decir, si se realizara un cierre de balance hídrico anual en la microcuenca del vertedero 1, solo por los datos de entrada de caudales potencialmente se tendría un error del 9.64% en el balance, producido por un desfase de 0,5 cm en los niveles de agua. Por tal motivo es de vital importancia controlar los niveles de agua reales que pasan por los vertederos y compararlos con los niveles compensados que entregan los sensores automáticos.

Sensibilidad de la calibración de la ecuación de regresión lineal a la extensión del periodo de datos disponibles

Los resultados revelan que, para los tres observatorios, cualquier duración del periodo de calibración de la ecuación (de 4 meses a 1 día tomados con una frecuencia de 5 minutos) produce excelentes resultados, encontrando coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe superiores a 0,96 (Figura 7). Es decir, que para hacer un relleno de datos entre dos sensores de presión, lo mínimo que se necesitaría es 1 día de registros con una frecuencia de 5 min. La explicación radica en que con un día de registro de datos se cubren los valores máximos y mínimos de la variación diaria de la presión atmosférica. Como en el resto del tiempo (días) la variación de la presión es similar (Eslava, 1991), la estimación de la presión con la ecuación calibrada produce errores mínimos (menores a 5 mm). En particular, debido a la calidad de los datos, en el observatorio de Mazar la eficiencia fue menor (entre 0,96 y 0,98) comparada a los observatorios de Zhurucay y Soldados (E_{NS} mayores a 0,99).

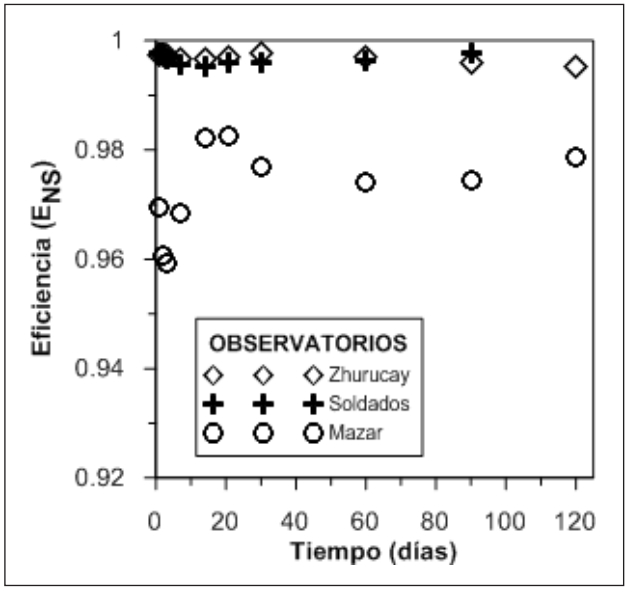


Figura 7. Análisis de sensibilidad de la calibración de la ecuación de regresión lineal. Eje x: periodo de datos usados para la calibración de la ecuación. Eje y: eficiencia en el periodo de validación de la ecuación calibrada. (ENS).

4. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo por objetivo determinar la magnitud en la que la estimación de datos de presión atmosférica (registrado por sensores automáticos) afectan al cálculo del nivel de agua en pequeños cauces, y cómo éstos a su vez afectan la estimación de caudales. Según la bibliografía revisada, para los Andes no existen estudios que se enfoquen en el control de calidad de los datos y en los efectos que producen sobre los procesos hidrológicos. Por otra parte, existen varios estudios con modelos hidrológicos que identifican que la deficiencia del modelo se da por la incertidumbre en los datos de entrada. Por lo tanto, el estudio es de alta importancia en el campo de la hidrología y en particular para los ecosistemas altoandinos, donde las labores de monitoreo son más complejas debido a las dificultades de acceso. El estudio fue realizado con datos de 3 observatorios ecohidrológicos ubicados entre los 2600 y 4200 m s.n.m al sur del Ecuador.

Para el relleno de datos faltantes o registrados incorrectamente por los sensores se plantearon dos métodos de relleno: regresión lineal e interpolación/extrapolación lineal. Además fue de interés identificar el periodo mínimo de datos requeridos en las estaciones barométricas para identificar ecuaciones de estimación confiables.

Al finalizar el estudio se concluyó que el mejor método para el relleno de datos de presión atmosférica en los tres observatorios es el método basado en regresiones lineales. Se obtuvo coeficientes de eficiencia medidas con Nash-Sutcliffe mayores a 0,71. Esto quiere decir que cuando se pierdan datos de presión atmosférica en un sitio es posible rellenarlos si se cuenta con observaciones realizadas en un sitio cercano. Además, los errores de sesgos absolutos (Abs bias) fueron menores a 0,5 cmH_2O, valor que corresponde a la precisión especificada de los barómetros utilizados en el estudio. La eficiencia alcanzada con las regresiones no tuvo una relación con respecto a la altura y distancia entre los sensores analizados.

Se encontró que el error producido al calcular el caudal a partir de datos de presión atmosférica estimada con regresión lineal es bajo y está en el rango de excelente (%Abs bias < 5%) a muy bueno (%Abs bias < 10%). Este resultado confirma que el relleno de datos de caudal, cuando se ha perdido la serie de datos de presión, es posible y tiene un alto grado de confiabilidad. Por otra parte, el método de interpolación y extrapolación lineal produjo errores en el cálculo del caudal de hasta un 86 % (%Abs bias), esto debido principalmente a la dificultad de estimar con precisión las alturas sobre el nivel del mar a las que se encontraban los sensores y a la calidad de los datos para realizar las interpolaciones

Finalmente el estudio mostró que es necesario tener un registro de datos de al menos un día en el sitio donde se desea estimar la presión atmosférica para calibrar la ecuación de regresión. En el análisis de

sensibilidad se encontró valores de E_{NS} mayores a 0,96 para periodos de calibración de entre 1 día y 4 meses usando datos registrados cada 5 minutos.

A futuro deberán estudiarse los efectos de la precisión de los sensores sobre el cálculo de caudales y su impacto sobre el balance hidrológico de las cuencas. Otro tema de interés es el diseño de estrategias costo-efectivas de monitoreo utilizando una combinación de tecnologías avanzadas disponibles.

AGRADECIMIENTOS

El estudio fue posible gracias a los proyectos PIC-08-460 y PIC-11-715 financiados por la SENESCYT y la Universidad de Cuenca. El trabajo en los 3 observatorios ecohidrológicos tuvo el apoyo de varias personas y organizaciones. Se agradece a CELEC EP, Unidad de Negocio Hidropaute, a Catherine Schloegel de la Fundación Cordillera Tropical y Stuart White de la Reserva de Vida Silvestre Mazar por el apoyo para implementar el observatorio Mazar; a IAMGOLD Ecuador por el apoyo logístico en Zhurucay; mientras que en Soldados se contó con la colaboración de los propietarios de los predios Sr. Jackson Fernández y Sr. Fernando Arias, así como del personal técnico y las autoridades de ETAPA - Parque Nacional Cajas.

REFERENCIAS

Achig, A., 2009. Análisis del habita del oso andino (Tremarctosornatus) en el bosque siempre verde montano y perspectiva comunitaria del conflicto humano – oso, Parque Nacional Sangay, Ecuador. Tesis de Master. Universidad de Costa Rica.

Amaya, G., Tamayo, C., Vélez, M., Vélez, J., Álvarez, O. 2009. Modeling the hydrological behavior of three catchments in the Uraba Region – Colombia. Avances en Recursos Hidráulicos. Medellín – Colombia 19: 21 - 38.

Bergmann, J.M. 1963. Compound Weir Study. Hydraulic Laboratory Report No. Hyd-505, Bureau of Reclamation.

Buytaert, W., Célleri, R., De Bievre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R. 2004b. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Science Reviews 79: 53 – 72.

Cuartas, L., Tomasella, J., Nobre, A., Nobre, C., Hodnett, M., Waterloo, J., De Oliveira, S., Randow, R., Trancoso, R., Ferreira, M. 2012. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. Journal of Hydrology, 462–463, 15–27.

Célleri, R., De Biévre, B., Ochoa, B. Villacís, M. 2012a. Guía Metodológica para el Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos. Iniciativa de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos – iMHEA, 21 p.

Célleri, R., De Biévre, B., Ochoa, B., Llambí, L., Soto, A., Borja, P. 2012b. Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino, capítulo 2.

Célleri, R., Feyen, J. 2009. The hydrology of tropical Andean ecosystems: Importance, knowledge status and perspectives. Mountain Research and Development 29: 350 - 355.

Crespo, P., Feyen, J., Wouter, B., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H., Ramíres, M. 2011. Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). Journal of Hydrology 407: 164–174.

De Biévre, B., 2002. Water Demand-Supply and Administrative Management in Medium Sized irrigation Schemes in the Sierra of Ecuador.» Ph.D. thesis, Katholieke Universiteit Leuven.

Eslava, J., 1991. Variación Temporal de la Presión Atmosférica en Bogotá. Academin Science Colombia 18 (69): 175-181.

ETAPA, 2003. Plan del Manejo del Parque Nacional El Cajas. Descripción biofísica de la zona, publicación interna.

FAO, 2006. Irrigation and Drainage Paper: Statistical analysis of weather data set. Food and Agriculture Organization, p 229 - 244.

Gribovszki, Z., Kalicz, P., Szilágyi, J. 2013. Does the accuracy of fine-scale water level measurements by vented pressure transducers permit for diurnal evapotranspiration estimation?. Journal of Hydrology 488: 166–169

Iñiguez, V., Borja, P., Crespo, P., Cisneros, F. 2008. Importancia de la Hidropedología en la Determinación de Procesos Hidrológicos a Escala de Ladera en Zonas de Páramo. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Quito.

Liu, Y., Feer, J., Beven K.,Matgen, P. 2009. Towards a limits of acceptability approach to the calibration of hydrological models: Extending observation error. Journal of Hydrology 367: 93 – 103.

Ochoa, B., De Biévre, B., Crespo, P., Villazón, M., Célleri, R., Guallpa, M., Cedillo, S. 2013. Problemas con la compensación de datos por presión barométrica y temperatura en sensores de nivel Schlumberger. iMHEA, publicación interna.

Pao-Shan Yu, Tao-Chang Yang, Shen-Jan Chen. 2001. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall - runoff model. Journal of Hydrology 244: 43 – 59.

Possia, N., Cerne, B., Campetella, C. 2003. Análisis Preliminar de la Tendencia de Presión en Argentina. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

Quichimbo, E., 2011. Estudio comparativo de los modelos NAM y DBMM. Facultad de Ingeniería - Universidad de Cuenca, tesis de pregrado.

Sorensen, Linda, 2006. Introduction to the Practice of Statistics. United States of America: W. H. Freeman and Company.

Thompson, S., 20012. Análisis histórico de la cobertura del suelo de la subcuenca del bajo río Mazar. Fundación Cordillera Tropical (FCT).

Tokay, A., Bashor, P., McDowell, V. 2010. Comparison of Rain Gauge Menasurements in the Mid - Atlantic Region. Journal of Hydrometeorology, pag: 553 - 565.

Vázquez, R., J. Feyen., 2002. Effect of potential evapotranspiration estimates on effective parameters and performance of the MIKE SHE-code applied to a medium-size catchment. Journal of Hydrology 270: 309 - 327.

Ven Te Chow, Maidment, D., Mays, L. 1996. Hidrología aplicada. MGraw-Hill Interamericana, p 58 – 62.

Wang, Y., Traore, S., Kerh, T. 2009. Computational performance of reference evapotranspiration in semiarid zone of Africa. Scientific Research and Essay 4: 577 - 583.

Whiteman, D., 2000. Mountain Meteorology, Fundamentals and Applications. Oxford University Press. New York, USA, 450 p

WMO, 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Word Meteorological Organization.

GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN HÍDRICA EN ZONA ÁRIDA: CASO DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ, NORTE DE CHILE.

WATER RESOURCES INFORMATION MANAGEMENT IN ARID AREA: CASE OF THE REGION OF TARAPACÁ, NORTH OF CHILE

Elisabeth Lictevout[1], Constanza Maass[1], Damián Córdoba[1], Venecia Herrera[1, 2], Reynaldo Payano[1], Jazna Rodriguez[1] y Jose Aguilera[1].

Resumen:

La Región de Tarapacá, localizada en el extremo norte de Chile, es una de las zonas más áridas del mundo, parte del desierto de Atacama. El contexto geográfico, climático, geomorfológico y geológico le confieren características hidrológicas e hidrogeológicas únicas que generan ambientes evaporíticos (salares) y acuíferos con recarga alóctona que representan el único recurso permanente. Desde la décadas de los noventa, con la instalación de los grandes proyectos de minería, el crecimiento poblacional y económico de la región ha generado una fuerte presión sobre los recursos hídricos, aumentando la demanda hídrica cual, en la actualidad, es mayor a la disponibilidad, dando pie a escenarios de competición y conflictos entre usuarios. En zona árida, la heterogeneidad temporal y espacial de las variables hidrometeorológicas y la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos involucrados requieren disponer de una cantidad más importante de datos, tanto espacial como temporalmente, para generar modelos hidrológicos e hidrogeológicos predictivos. La Dirección General de Aguas (DGA) es la institución mandatada por el Estado para operar y mantener una red de monitoreo hidrométrica de escala regional. Esta red genera datos que permiten describir las características generales de los recursos hídricos y tendencias principales pero no permite una caracterización al nivel de cuenca o masa de agua. Los datos registrados presentan deficiencias tanto en cantidad como en calidad. Las carencias al nivel espacial y temporal, así como las deficiencias en la representatividad y fiabilidad de los datos no permiten tener un conocimiento suficiente de la situación de los recursos hídricos, cuantificarlos y predecir su evolución. Por consiguiente, actores privados han desarrollado su propia red hidrométrica y sus propios estudios respondiendo a objetivos sectoriales y locales. Generan una cantidad de datos no despreciable. Además, en Chile, se han registrado 43 organismos vinculados con la gestión del agua. Así, la información sobre los recursos hídricos es dispersa y de difícil acceso. En este contexto de incertidumbre en cuanto al nivel de conocimiento e información existente sobre los recursos hídricos de la región, el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) de la Región de Tarapacá generó un diagnóstico de la información hídrica existente, en base a una recopilación, sistematización y análisis de los datos y estudios existentes. Los principales productos son un análisis crítico y una herramienta de gestión y transferencia de la información. El análisis integral de todos los datos generados en la zona, tanto por actores públicos como privados permite reducir la incertidumbre de los estudios y modelos. Compartir esta información en una plataforma de gestión de la información permitiría optimizar recursos y mejorar la gestión conjunta de los recursos hídricos. En este contexto, mejorar el conocimiento de los recursos hídricos constituye una precondición a su gestión eficiente y por ende al desarrollo sostenible de la región.

Palabras clave: Recursos hídricos, zona árida, Región de Tarapacá, diagnóstico, red de monitoreo hidrométrica, gestión del agua.

Abstract

The Tarapacá Region, located in the extreme north of Chile, is one of the most arid areas in the world, part of the Atacama Desert. The geographical, climatic, geomorphological and geological characteristics lend the region unique hydrological and hydrogeological features that generate evaporitic environments (salt flats) and large aquifers with allochthonous recharge. Groundwater represents the only permanent water resource. Since the nineties, with the onset of large mining projects, the constant population and economic growth generated strong pressure on water resources, increasing demand, today higher than water supply, boosting scenarios of competition and conflict over water uses. In arid area, the temporal and spatial heterogeneity of hydrometeorological variables and the complexity of hydrological and hydrogeological processes involved, require the availability of a larger amount of data, both temporarily and spatially to generate predictive hydrological and hydrogeological models. The Chilean Water General Directorate (DGA) maintains and operates a regional scale hydrometric network, as a legal obligation under the Chilean Water Code. The monitoring network allows the description of general characteristic of water resources and trends at regional and national level but does not allow the characterization

[1] Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH). Universidad Arturo Prat. CONICYT REGIONAL/CIDERH. R09I1001. Elisabeth.lictevout@ciderh.cl; +56 (57) 2530800

[2] Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad Arturo Prat.

Recibido: 01/11/2013
Aceptado: 05/02/2014

at water basin or water body level. Recorded data present deficiencies concerning both the quantity and the quality. Gaps in space-time data and deficiencies of data representativeness and reliability do not allow an accurate knowledge of the water resources situation and evolution. Thus, private actors developed their own hydrometric network and their own studies, responding to their own needs. It represents a non-negligible amount of Data. Moreover, in Chili, 43 organisms linked with water resources management were registered. Thus, the water resources information is dispersed and difficult to access. In this context of uncertainty about the level of knowledge and existing information on water resources in the region, the Water Resources Research and Development Center – CIDERH of Tarapacá Region, established in 2010, produces an assessment of the existing information, based on a review, systematization and analysis of water resources data and studies. The main results are a critical analysis and an information management and transfer tool. An integrated analysis reduces the uncertainty of studies and models. To share this information on a platform that manages the information would optimize resources and improve the joint management of water resources. In this context, a thorough knowledge of water resources is a precondition to its efficient use and therefore to the sustainable development of the region.
Key words: Water resources, arid area, Tarapacá Region, water assessment, water management, hydrometric monitoring network.

INTRODUCCIÓN

La Región de Tarapacá, ubicada en el extremo norte de Chile, es una de las zonas más áridas del mundo. Se caracteriza por presentar cuencas cerradas o endorreicas en el Altiplano (cuencas altiplánicas) y en la Depresión Central (cuenca Pampa del Tamarugal) y cuencas arreicas en la zona costera. Es limitada al norte y al sur por cuencas exorreicas que desembocan al mar (Camiña y Río Loa; figura 1).

Figura 1: Mapa de las zonas hidrográficas de la Región de Tarapacá

De oeste a este, se definen cinco elementos geomorfológicos: Planicie litoral y Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera, Altiplano y Cordillera de los Andes (figura 2).

Figura 2: Unidades geomorfológicas de la Región de Tarapacá

Las precipitaciones, casi nulas en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, aumentan gradualmente con la altura en la Precordillera hasta alcanzar en el Altiplano un promedio anual de 150 a 180 mm (PUC, 2009; GCF, 2010) La evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico, ya que supera ampliamente las precipitaciones al alcanzar un promedio entre 2.000 y 3.000 mm/año en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, y entre 1.000 y 2.000 mm/año en el Altiplano (PUC, 2009; GCF, 2010). Dominan ambientes evaporíticos (salares) y napas subterráneas con recarga alóctona que conforman el único recurso permanente (Lictevout et al., 2013). Estas napas se recargan

lateralmente desde las zonas de precipitación en el Altiplano y Precordillera mediante movimientos muy lentos del agua (Dingman & Galli, 1965; Margaritz et al. 1990; Grilli et al., 1999). Se ha estimado que gran parte de los recursos hídricos subterráneos de la región se generaron durante una fase húmeda comprendida entre los 17.000 y 11.000 años y crecidas durante el Holoceno (últimos 11.000 años) hasta la actualidad (Aravena, 1995; Margaritz et al., 1990; Grilli et al., 1999). Lo anterior lleva a considerar parte del agua subterránea de la región como no renovable (Grilli et al., 1999; Tröger et al., 2004). Los flujos superficiales alcanzan la Depresión Central de forma esporádica durante eventos hidrometeorológicos extremos. Los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Región de Tarapacá presentan un amplio intervalo de valores de salinidad natural, entre 50 y 350.000 (contenido de Sólidos Totales Disueltos - STD) así como elementos tóxicos y/o nocivos para la salud. Se han identificado áreas con elevadas concentraciones de Arsénico (As), Boro (Br) y Manganeso (Mn), principalmente en todas las aguas del Altiplano y algunas quebradas (Aroma, Chacarilla y Guatacondo). La distribución de estos elementos de origen natural (sedimentos volcánicos de la cordillera de los Andes) es altamente heterogénea (Ayala et al., 1994; DGA, 1978). Esta heterogeneidad temporal y espacial de las variables hidrometeorológicas e hidrológicas es característica de las zonas áridas, a la cual se añade a la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos involucrados.

Desde la décadas de los noventa, con la instalación de los grandes proyectos de minería, el crecimiento poblacional y económico de la región ha generado una fuerte presión sobre los recursos hídricos, aumentando la demanda. De hecho, el norte de Chile presenta una demanda hídrica mayor a la disponibilidad (Banco Mundial, 2011), dando pie a escenarios de competición y conflictos entre usuarios – minería, abastecimiento de la población, agua ancestral y agricultura, medioambiente. Se ha generado conflictos entorno al uso de ciertos cuerpos de agua, además y resaltado la existencia de áreas naturales altamente sensibles. El rubro con el caudal otorgado más alto lo constituyen las compañías mineras seguido por la empresa sanitaria (abastecimiento de la población). La estimación del consumo de agua (extracciones) y de los respectivos usos, basada en la información contenida en el Catastro Nacional de Agua de la Dirección General de Aguas (DGA), organismo del Estado encargado de gestionar y administrar el recurso hídrico, muestra un alto grado de incertidumbre debido a que la información se encuentra incompleta y desactualizada. Dicha incertidumbre afecta la estimación de la descarga, y por ende, el balance hídrico de las cuencas y acuíferos. De acuerdo a los estudios analizados (JICA, 1995; DICTUC, 2005, 2007ª y 2007b; DGA, 2009 y 2011), todos los acuíferos explotados (con extracciones) de la región muestran un balance negativo (las descargas superan la recarga), si bien tal afirmación no se puede cuantificar, por una parte, por no disponer de información actualizada y, por otra parte, por existir incertidumbres en la estimación de la recarga y las descargas. Esta situación se materializa con un descenso continuo y paulatino de los niveles estáticos.

En la actualidad, los usuarios e instituciones públicas generan datos y realizan estudios de acuerdo con sus propias necesidades, de manera puntual y sectorial. El Banco Mundial y Gobierno de Chile (2013) han registrado 43 organizaciones vinculadas con la gestión del agua. El acceso a la información (datos, estudios, etc.), dispersa en las diferentes entidades públicas, privadas y académicas, es un proceso difícil y lento. La información generada por actores privados no es accesible o no es conocida, aunque sea de ámbito público.

Esta situación ha generado a un clima de incertidumbre y desconfianza por parte de las autoridades e instituciones públicas, incluso de actores privados. El desconocimiento de la cantidad y calidad de la información existente no permite caracterizar y cuantificar los recursos hídricos disponibles y su evolución en el tiempo acorde con los escenarios de desarrollo actuales. Dificulta o impide una toma de decisión informada, tanto por parte de los usuarios del recurso, como de las autoridades.

En este contexto se creó en 2010 el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) de la Región de Tarapacá. La primera etapa del Centro fue la realización de un diagnóstico de la información disponible sobre los recursos hídricos de la Región, con el objetivo de realizar un análisis cualitativo, cuantitativo, espacial y temporal de la información existente; además se identificaron brechas de información y se creó una herramienta de gestión y transferencia de la información, dirigida a toda persona o institución con actividades vinculadas al recurso hídrico.

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada consistió en un proceso de seis etapas, las cuales se detallan de manera cronológica en la figura 3: 1) Recopilación exhaustiva de estudios, datos, cartografías y la identificación de los actores generadores de datos en la región, incluyendo entidades públicas, privadas y académicas de ámbito local, nacional e internacional; 2) Revisión de la información; 3) Digitalización y sistematización en un Sistema de Información Geográfica (SIG); 4) Análisis cualitativo y cuantitativo de la información disponible, a escala regional y por unidad hidrográfica; 5) Difusión y transferencia de los resultados y 6) Actualización de la información.

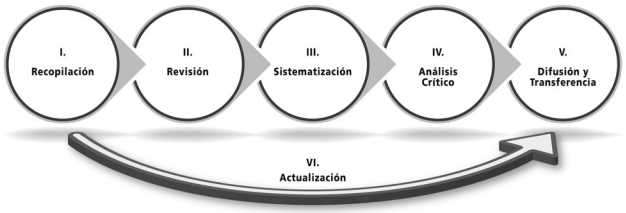


Figura 3: Etapas metodológicas

1. Recopilación de la información

La primera etapa consistió en una búsqueda y recopilación exhaustiva de información referente a los recursos hídricos y otros temas afines de la región, con especial interés en los ámbitos de la hidrología, hidrogeología, hidroquímica, geología y geomorfología. Esto se realizó por medio de la revisión de bibliotecas, centros de documentación, bases de datos y páginas web, desde instituciones públicas, empresas privadas y entidades académicas. Se obtuvieron en total 306 documentos, incluyendo estudios, artículos de revistas científicas, tesis, memorias de congresos, catastros, cartografías, Planes de Seguimiento Ambiental (PSA), informes de monitoreo y Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA). A escala temporal, se recopiló información desde la década de 1890 hasta la fecha, destacándose una mayor frecuencia de documentos en temas hídricos, a partir de la década de 1960. La recopilación de bases de datos alfanuméricas, cartografías y coberturas geográficas o *shapefiles*, incluyó por una parte información hidrometeorológica y agrometeorológica, catastros de pozos, monitoreo de empresas privadas e información sobre Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA), y por otra, información de carácter espacial sobre la hidrografía, geografía, geología y geomorfología de la región. En esta etapa, se realizó una base de datos de las entidades generadoras de datos en la región.

2. Revisión de la información

Se revisó el contenido de la información recopilada, con especial énfasis en los objetivos, metodología y resultados estipulados en cada documento, así como en el tipo y cantidad de datos generados, el área de estudio y el contexto de formulación de la información. Todo esto se integró en una ficha técnica por documento, la cual se construyó como una herramienta de trabajo para las siguientes etapas de sistematización y análisis de la información; permitió sintetizar la información más relevante en cuanto a fuente generadora de datos e información. En este sentido la etapa de revisión tuvo dos objetivos:

- La priorización de la información con la realización de 211 fichas técnicas de los documentos considerados más importantes en términos de calidad (aporte de información nueva) y cantidad de información (generación de datos).
- La trazabilidad de la información: se realizó un seguimiento en cuanto al contenido, origen, localización, método de obtención, tiempo de medición, vigencia y forma de acceso a la información. Se realizaron reuniones de trabajo con todos los actores generadores de datos con el objetivo de aclarar dudas y confirmar los datos sistematizados.

En esta etapa se consideró toda la información existente, independiente del nivel de precisión, confianza y representatividad, ya que la validación de estos criterios depende del objetivo para el cual se pretende usar los datos.

3. Digitalización y sistematización de la información

Se sistematizó la información recopilada y revisada de acuerdo a tres unidades: un Centro de Documentación, un Sistema de Información Geográfica (SIG) y fichas **síntesis por zona hidrográfica.** El Centro de Documentación se creó en las oficinas del CIDERH como una unidad de información especializada en el tema de los recursos hídricos de la región. Para esto se ordenaron todos los documentos recopilados en un sistema de clasificación documental de acuerdo a la temática, tipología, año de formulación y área de estudio del documento. Asimismo se le asignó a cada ejemplar un código único de identificación. Se elaboró un SIG en el formato geodatabase (GDB) mediante el programa ArcGIS 10, utilizando como sistema de referencia espacial las coordenadas UTM, el datum WGS 84 y el huso 19 sur. Para esto se seleccionaron y estandarizaron bases de datos con componente espacial identificadas en la etapa de revisión, a partir de las cuales se crearon capas de información referentes a estaciones de monitoreo del recurso hídrico así como de otros elementos hidrológicos, geológicos, geomorfológicos y de índole legal.

4. Análisis crítico

Se analizó de forma integral la cantidad y calidad de información disponible a escala regional y por zona hidrográfica, priorizando la información de relevancia. Se generó un diagnóstico en cuanto a las brechas de información y necesidades de información y conocimiento. El análisis espacial y temporal se realizó con la herramienta SIG, lo que permitió clasificar las unidades hidrográficas de cada zona de acuerdo al nivel de información.

5. Difusión y transferencia

Esta etapa tuvo como objetivo transmitir y poner a disposición de la comunidad los resultados del trabajo. En esta línea se creó el *"Observatorio del Agua"*, herramienta web de uso público integrado por un SIG *web* y por un Centro de Documentación asistido

mediante un catálogo en línea. La creación del SIG *web* se realizó mediante la exportación de SIG a la plataforma *ArcGIS online*. Por otro lado, el catálogo en línea del Centro de Documentación se elaboró mediante el programa *ASP VBScript*, permitiendo crear un sistema de consulta de toda la documentación disponible en el centro. Finalmente, se editó un libro que se difundió ampliamente a todos los actores regionales, nacionales e internacionales.

6. Actualización

Finalmente, considerando que la generación de información es un proceso dinámico, se contempla una actualización constante con la nueva información que se genere en la región, o en su defecto, se integrará información existente no considerada. Específicamente, se definió la necesidad de actualización constante del *"Observatorio del Agua"* y del trabajo de análisis regional y por zona hidrográfica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Región de Tarapacá ha sido objeto de una gran cantidad de estudios: con más de 300 documentos recopilados a la fecha, sistematizados, integrados y analizados en conjunto, se construyó una imagen actualizada del conocimiento de los recursos hídricos de la región, focalizando en la trazabilidad de la información, es decir, en la reconstrucción de la historia completa de la información: ¿Quién la generó y quien la posee? ¿Cuándo se generó? ¿Por qué se generó? ¿Cómo se generó (metodología)? ¿Dónde se encuentra? ¿Cuál es su disponibilidad y accesibilidad?

Si bien es destacable la cantidad de información recopilada, se identificaron brechas tanto en la calidad como en la cantidad de información disponible, al nivel espacial y temporal. Todos los estudios existentes se basan en los datos generados por la red de monitoreo de la DGA, la cual presenta deficiencias que generan incertidumbres tanto a nivel de calidad y cantidad de los datos generados, como a nivel temporal y espacial. **A nivel espacial**, existen cuencas y acuíferos que no presentan datos ni estudios o presentan un nivel muy escaso de información, a pesar de tener características hidrológicas e hidrogeológicas importantes (figuras 4, 5, 6 y 7): en la zona altiplánica, de un total de diez cuencas (PUC, 2009), siete no tienen estaciones fluviométricas DGA (cuatro cuencas no tienen ninguna estación fluviometrica) y nueve no tienen pozos de monitoreo DGA (6 cuencas no tienen ningún pozo de monitoreo). En la zona Pampa del Tamarugal, de un total de 10 cuencas, seis no tienen estaciones meteorológicas DGA (cinco cuencas no tienen ninguna), nueve cuencas no tienen estaciones fluviométricas DGA (ocho no tienen ninguna), nueve cuencas no tienen pozos de monitoreo DGA (siete no tienen ninguno). En la zona Salar de Llamara, de un total de 3 cuencas (DICTUC, 2006), dos no tienen estaciones meteorológicas y fluviometricas. No existen pozos de monitoreo de la DGA. Existe un vacío de información hidrogeológica en todas las cuencas y acuíferos de la región, a excepción de los acuíferos con interés productivo (Pampa del Tamarugal, Lagunilla, Coposa y Minchincha). Las cuencas y subcuencas en las cuales se registraron datos y que fueron objeto de estudios, presentan información no siempre confiable, representativa y suficiente:

- **A nivel temporal**, en la región existen algunos registros de precipitación, caudal superficial, niveles de acuíferos y calidad del agua de varias décadas de duración. Aunque escasos, representan una fuente de información muy valiosa que permite analizar estadísticamente el comportamiento de las variables. Sin embargo su registro continuo es todavía escaso con interrupciones durante eventos hidrometeorológicos extremos o fallos tecnológicos.
- **La representatividad** de los datos generados por la red de monitoreo de la DGA no siempre está asegurada: la localización de las estaciones de monitoreo responde en prioridad a criterios de seguridad y acceso; los pluviómetros están ubicados en el fondo de los valles, en los poblados, lo que resulta en un vacío de información meteorológica en cabecera de cuencas y en la presencia de obstáculos que interfieren con la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro (árboles, cerros, cables, etc.). Las estaciones fluviométricas (registro de caudales superficiales) no están diseñadas para medir los caudales de crecida, incluso, en varios casos, no miden la totalidad del flujo base: fluctuación del lecho del flujo base, división en varios brazos de escurrimiento, secciones no bien definidas, presencia de bocatomas para riego. Los pozos de monitoreo no están localizados en lugares estratégicos, tanto al nivel hidrogeológico (cierre de cuencas y subcuencas, límites de acuíferos) como a nivel de monitoreo de extracciones. Existen acuíferos explotados que no son monitoreados por la institución pública responsable.
- **El acceso a la información** generada por la DGA se realiza mediante la entrega de ficheros Excel disponibles tres meses después del levantamiento de la información registrada. Esta información es validada por la oficina nacional de la DGA pero no es procesada ni se entrega analizada.

La información hidrogeológica presenta muchos vacíos que impiden realizar una caracterización y cuantificación precisa de la disponibilidad de agua en los diferentes cuerpos de agua de la región, aun cuando los acuíferos albergan el único recurso permanente que sostiene el desarrollo regional. No están bien definidos los límites de los acuíferos y se desconoce la evolución de los niveles piezométricos. Los flujos subterráneos subsuperficiales y profundos, y sus in-

teracciones con el recurso superficial, no han sido descritos y hasta ahora han sido considerados como compartimentos independientes. En consecuencia, no existe una comprensión del mecanismo de recarga desde la Precordillera y el Altiplano a donde ocurren las precipitaciones hacia la Depresión Central (Lictevout et al., 2013). Los flujos profundos han sido descritos por algunos estudios (JICA, 1995; Karzulovic & Garcia, 1979) que analizaron la composición isotópica del agua subterránea y superficial (Margaritz *et al*., 1990; Risacher *et al*., 1998). Sin embargo, las dificultades metodológicas y el carácter puntal de los estudios, no permitieron comprobar la existencia de estos flujos, aunque la presencia de aguas termales en la Precordillera (Mañiña, Pica, Chuzmisa) entre 1500 y 3500 m s.n.m. demuestra circulaciones hídricas profundas. En general, no se ha dado la importancia suficiente al conocimiento de la geología de los acuíferos de la región (Pampa del Tamarugal, Pica, Salar de Llamara y acuíferos del Altiplano y acuíferos aluviales de las quebradas). A pesar de que se realizaron modelos numéricos de los acuíferos con intereses productivos, no se considera la geología como un factor determinante en las características hidrogeológicas del modelo, ya que no se ha tomado en cuenta la heterogeneidad espacial, vertical y horizontal (anisotropía) (Lictevout et al., 2013). Se considera que la insuficiencia de datos de entrada repercute directamente en la calidad del modelo e introduce una gran incertidumbre sobre los resultados. Por otro lado, el conocimiento de ciertos parámetros hidrológicos se considera insuficiente como es el caso de la evaporación, de la evapotranspiración y de la escorrentía. La evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico al superar ampliamente las precipitaciones, pero no existe una metodología satisfactoria para estimar esta variable con menor incertidumbre: la bandeja de evaporación presenta problemas tecnológicos y logísticos (el agua se congela en el Altiplano y su relleno se dificulta en zonas de difícil acceso y poca población); el domo no permite una medición continua sino puntual, cuando la variación diaria y estacional de la evaporación es grande. Los sensores dan una estimación indirecta. Las incertidumbres sobre estos parámetros afectan directamente la estimación del balance hídrico y de la recarga actual de los acuíferos (cantidad de agua que se infiltra y que se evapora). Existen pocas estaciones de monitoreo de la calidad de agua, especialmente en lugares estratégicos (cerca de actividades contaminantes). No existe información sobre enfermedades hídricas. Debido a que se identifican áreas con elevadas concentraciones de As, Br y Mn, principalmente en todas las aguas del Altiplano y en varias quebradas, es necesario el monitoreo de las concentraciones de vanadio (V), zinc (Zn) y selenio (Se) por su relación con el arsénico. También es necesario el monitoreo de la calidad del agua según las normas de vigilancia de las aguas continentales: programas de tres años en cuatro estaciones climáticas. La estimación del consumo de agua (extracciones) y de los respectivos usos, basada en la información contenida en el Catastro Nacional de Agua de la DGA, presenta altas incertidumbres y se intuye una diferencia notable entre el caudal otorgado y el consumo real, ya que la DGA por limitaciones internas no ha podido poner en marcha un programa de control de extracciones de los DAA, derecho real otorgado de manera gratuita y a perpetuidad. Asimismo, se desconoce el uso asignado a cada DAA y las transacciones de DAA que ocurren después del otorgamiento (propietario actual del DAA). Esto conlleva una restricción importante para la estimación de los balances hídricos de la región.

La heterogeneidad espacial y temporal de las variables hidrometeorológicas y la complejidad de los procesos hidrogeológicos involucrados requieren disponer de una cantidad suficiente de datos tanto al nivel espacial que temporal para reducir la incertidumbre. Son necesarias series muy largas de tiempo (varias décadas) para aproximarse a un promedio que tenga representatividad estadística; también es necesario una cobertura que tenga en cuenta la heterogeneidad espacial, ubicando las estaciones de monitoreo en lugares estratégicos para obtener datos representativos de la variables. En caso de la precipitación, las variaciones locales se visualizan en distancias a veces inferiores a 10 kilómetros. En los estudios actuales, la insuficiencia en la cantidad de datos se compensa por información generada en otras cuencas.

La mayoría de los estudios se generaron de forma puntual, de acuerdo a necesidades sectoriales. Muchos se basan y se limitan al análisis de los datos generados por las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA. Entre los estudios que generaron datos de forma más integral, se destaca JICA-DGA (1995), DICTUC (2008) y PUC (2009). Los datos generados por estaciones de monitoreo pertenecientes a instituciones privadas y académicas raramente se han analizados en conjunto. A parte de la red de monitoreo hidrometeorológica de la DGA existen redes privadas, cuyos datos son difícilmente accesible aunque sean de ámbito público (registrados en el marco de una Resolución de Calificación Ambiental, por ejemplo). En este trabajo, se realizó una recopilación exhaustiva de todos los puntos en los cuales se genera información meteorológica, fluviométrica, hidrogeológica y de calidad de agua, tanto de fuente pública, académica como privada. Resultó en la elaboración de una imagen clara de quién generó información, quien la posee, cuándo se generó, por qué se generó, cómo se generó, dónde se encuentra y cuál es su disponibilidad y accesibilidad.

En resumen, se observa que, a nivel regional, se encuentran vigentes 18 estaciones meteorológicas DGA versus 50 estaciones meteorológicas privadas, académicas y otras instituciones públicas (figura 4). Existen 12 estaciones fluviométricas de la DGA versus 10 estaciones fluviométricas pertenecientes a empresas privadas (figura 5). Existen 39 pozos de monitoreo de la DGA versus 515 pozos monitorea-

dos por empresas mineras (figura 6). Finalmente la DGA cuenta con 17 estaciones de monitoreo de calidad de agua (subterráneo y superficial) versus 179 pertenecientes a entidades privadas (figura 7). Aunque no repartido espacialmente de manera homogénea (se ubican en las zonas de interés particulares), analizados en conjunto con la red pública, reducirían la incertidumbre de los modelos y estudios.

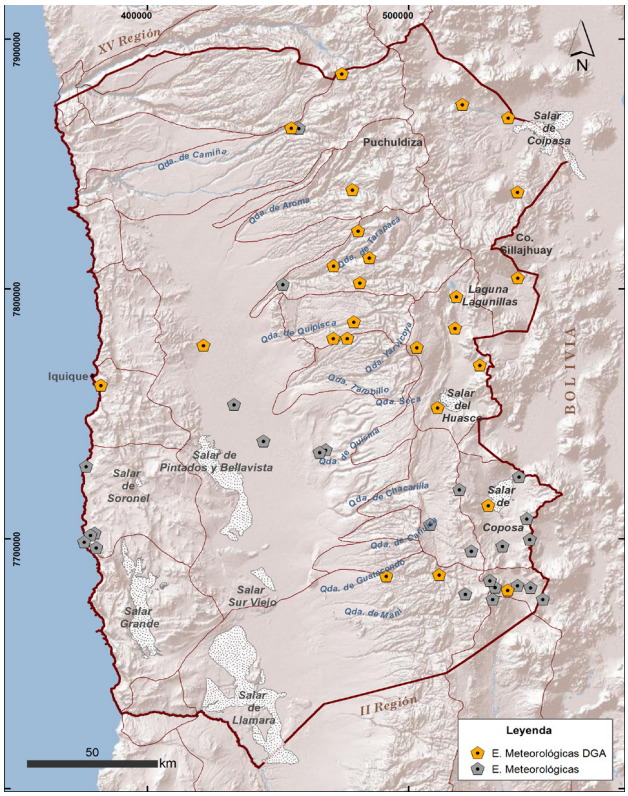


Figura 4: Mapas de las estaciones meteorológicas de la Región de Tarapacá

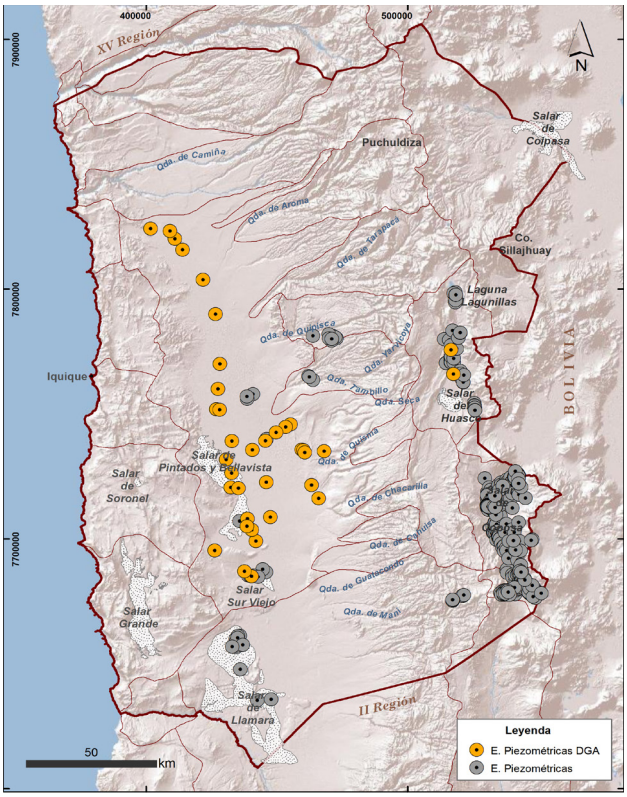


Figura 6: Mapas de las estaciones piezométricas de la Región de Tarapacá

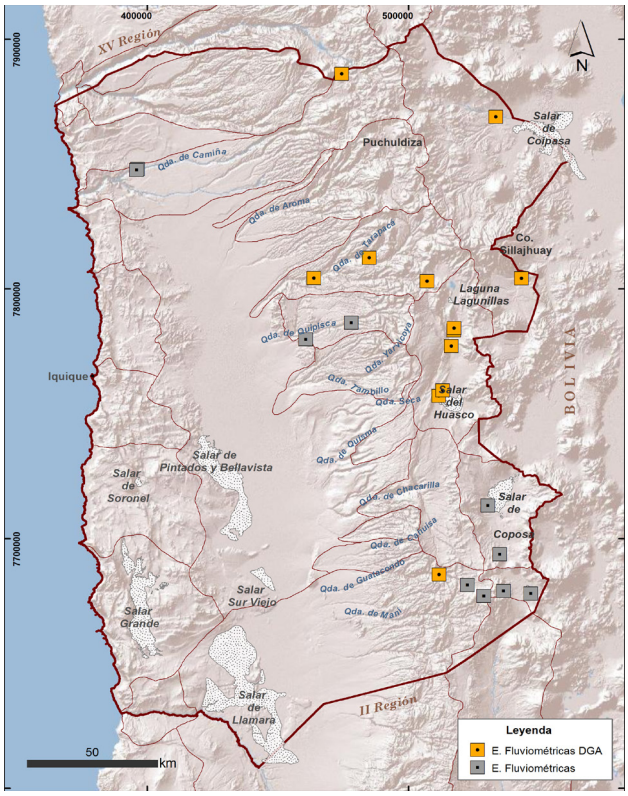


Figura 5: Mapas de las estaciones fluviométricas de la Región de Tarapacá

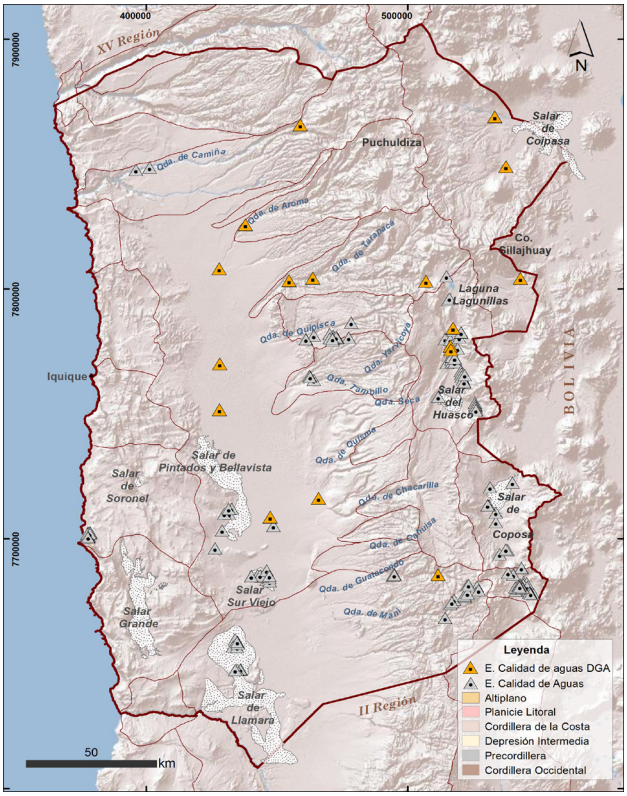


Figura 7: Mapas de las estaciones calidad de agua de la Región de Tarapacá

El Observatorio del Agua, herramienta local y regional de gestión de la información hídrica:

Uno de los principales productos del trabajo fue la creación de una herramienta para la gestión y transferencia de la información hídrica. El *Observatorio del Agua* se compone de dos unidades: un *Centro de Documentación* y un *SIG web* y se presenta como una herramienta de uso público para toda la comunidad. El acceso a esta se realiza por medio del *sitio web* www.ciderh.cl. La herramienta *web* nace como respuesta al tercer objetivo específico del estudio: *"Crear una herramienta de gestión y transferencia de la información, dirigida a toda persona o institución con actividades vinculadas al recurso hídrico".* Pensada inicialmente como una necesidad imperativa de tener información y datos para realizar las investigaciones del Centro, se desarrolló en respuesta a la necesidad regional de tener acceso a esta información para poder abordar la gestión de sus recursos hídricos. El observatorio es una herramienta dinámica y publica para gestionar (recopilar, sistematizar, analizar) y transferir la información de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá y está dirigida a todos los grupos de interés. No muestra datos sino la trazabilidad de la información hídrica, buscando mejorar el acceso a la información y facilitar los procesos de investigación y gestión.

El desarrollo actual y futuro de la herramienta apunta a un objetivo más amplio. El Observatorio se está transformando en una plataforma que recibirá, sistematizará, analizará y transferirá datos hídricos generados en la región. Mediante motores de búsqueda y filtros de información, se busca mejorar más aún el acceso a la información por parte del usuario, presentando datos y metadatos, de forma estandarizada para cada estación de monitoreo.

CONCLUSIÓN

En zona árida, la heterogeneidad temporal y espacial de las variables hidrometeorológicas y la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos involucrados requieren disponer de una cantidad más importante de datos, tanto espacial como temporalmente, para generar modelos hidrológicos e hidrogeológicos predictivos que permitan conocer el estado actual de los recursos hídricos y su evolución en el tiempo, de acuerdo al nivel y modelo de desarrollo. Constituye una precondición para lograr una gestión eficiente e integrada del agua, aún más en una zona de extrema aridez. Los diferentes actores necesitan diferentes tipos de datos y diferentes precisiones según el uso destinado a los datos y según el nivel de análisis (local, regional, nacional). En la actualidad, en el norte de Chile, no existe un conocimiento actualizado del estado de los recursos hídricos de la región, su evolución y predicción a corto, medio y largo plazo. La información existente no permite construir este conocimiento. El nivel de conocimiento y la información generada en la región permite describir las características y tendencias generales para un análisis a nivel nacional. Sin embargo, no es suficiente para la planificación y gestión a nivel regional y menos a nivel local (cuenca o acuífero). Los datos generados son insuficientes para la cuantificar recursos y predecir la evolución de los diferentes compartimentos hídricos. Es necesario evaluar el coste de operar y mantener una red de monitoreo versus la utilidad y accesibilidad de la información generada para usuarios, autoridades, instituciones públicas y privadas relacionadas con el recurso hídrico. Esta relación justifica la necesidad de compartir la información por los diferentes actores en la región lo que permitiría reducir costes y optimizar recursos: coste de instalación de estaciones, operación y mantenimiento, procesamiento y validación de datos. Aun así, la colaboración y participación de los usuarios en la gestión del agua es una etapa obligatoria hacia una mejor gestión y a un desarrollo sostenible. Además, adquirir, integrar y asimilar el conocimiento histórico permitirá dar la visión necesaria para planificar el futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 1994. Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, Etapa I, Primera región. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 48 p.

Aravena R. 1995. Isotope Hidrology and Geochemistry of Northern Chile Groundwaters. Bulletin de l'Institut Français d´Études Andines, 24 (3) : 495-503.

Banco Mundial. 2011. CHILE: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. 92 p.

Banco Mundial y Gobierno de Chile. 2013. Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua. 220 p.

Lictevout, E., C. Maass, D. Córdoba, V. Herrera & R. Payano. 2013. Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá: Diagnostico y sistematización de la información. CIDERH-UNAP, Santiago, Chile. 226 p.

Dingman R. & C. Galli. 1965. Geology and Ground-Water Resources of the Pica Área, Tarapacá Province, Chile. Geological Survey Bulletin 1189, Washington, United States of America. 129 p.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2005. Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Santiago, Chile.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2006. Actualización de la estimación de la recarga acuíferos de Pampa Tamarugal y Llamara.

En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VII.2 Hidrología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2007a. Modelación de la evolución del nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal. En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VIII.2 Hidrogeología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2007b. Modelación de la evolución del nivel de la napa en el salar de Llamara. En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VIII.3 Hidrogeología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA). 1978. Calidad de Agua Primera región. Chile. 130 p.

Dirección General de Aguas (DGA). 2009. Reevaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Llamara SDT Nº 281. Santiago, Chile. 10 p.

Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal SDT Nº 311. Santiago, Chile. 46 p.

Hernández, S. 2005. Sistematización, espacialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del norte de Chile, SDT N° 221. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 186 p.

GCF Ingenieros Ltda. 2010. Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de chile, XV, I, II y III regiones, SIT Nº221. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 167 p.

Geohidrología Consultores Ltda. 2012. Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Tarapacá, S.I.T. nº290. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 345 p.

Grilli, A., E. Aguirre, M. Duran, F. Townsend & A. Gonzáles. 1999. Origen de las aguas subterráneas del sector Pica–Salar del Huasco, provincia de Iquique, I región de Tarapacá. XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, Antofagasta, Chile.18 p.

Japan International Cooperation Agency (JICA); Pacific Consultants International & Dirección General de Aguas (DGA). 1995. The study on the development of water resources in northern Chile (El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile). Gobierno de la República de Chile, Chile.

Karzulovic, J. & F. García. 1978. Evaluación de los recursos hídricos de la provincia de Iquique. Antecedentes básicos. Dirección General de Aguas (DGA), Chile. 211 p.

Magaritz, M., R. Aravena; H. Peña, O. Suzuki & A. Grilli. 1990. Source of Groundwater in the Desert of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Groundwater from the Andes. Ground Water 28: 513-517.

Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC). 2009. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de aguas en áreas prioritarias de la zona norte de chile, regiones XV, I, II y III. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.

Risacher, F., H. Alonso & C. Salazar. 1998. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III Regiones, Chile. Santiago, Chile. 345 p.

Tröger U. & D. Gerstner. 2004. Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la formación Altos de Pica, SDT N° 174. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 27 p.

ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LAS SEQUÍAS EN MÉXICO

SOCIOECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS OF DROUGHT IN MEXICO

David Ortega-Gaucin[1] e Israel Velasco[1]

Resumen

La sequía es un fenómeno natural impredecible que tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio, y sus efectos son, con frecuencia, desastrosos. En este trabajo se presentan los principales aspectos socioeconómicos y ambientales relacionados con las sequías y sus impactos en México. Se incluye en principio un apartado en el que se analiza el concepto de sequía y los tipos de sequía identificados en la literatura especializada, así como los principales impactos genéricos de las sequías en los sectores económico, social y ambiental. Luego se presenta una narrativa sobre los impactos de las sequías en México, desde la época prehispánica hasta la actualidad. Finalmente, se incluye un apartado dedicado a analizar la vulnerabilidad actual ante la sequía en México. Se concluye que las sequías ocurridas en el pasado en este país han afectado principalmente al sector agropecuario y a la población rural, y han tenido un carácter altamente social; asimismo, en la actualidad la población y los diversos sectores socioeconómicos de ciertas áreas del país (sobre todo en el norte y centro), siguen siendo muy vulnerables ante los embates del fenómeno.
Palabras clave: sequía, agua, déficit hídrico, vulnerabilidad.

Abstract

Drought is an unpredictable natural phenomenon that tends to spread irregularly over time and space, and its effects are often disastrous. This paper presents the main socioeconomic and environmental aspects of drought and its impacts in Mexico. Includes a section in which is analyzed the concept of drought and drought types identified in the literature, as well as generic impacts of droughts in the economic, social and environmental sectors. Then presents a narrative about the impacts of droughts in Mexico from pre-hispanic times to the present. Finally, includes a section focused on the analysis of the current vulnerability to drought in Mexico. Concludes that droughts occurred in the past in this country have mainly affected the agricultural and livestock sector and the rural population, and have had a highly social nature; also, today the population and the various socioeconomic sectors of certain areas of the country (particularly in the north and center), remain highly vulnerable to the ravages of the phenomenon.
Keywords: drought, water, water shortage, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

Desde siempre, la presencia de sequías y la consecuente falta de agua han sido factores que han influido en el desarrollo de la humanidad; las grandes hambrunas (los efectos más dramáticos y trágicos de la sequía) han propiciado la movilización de pueblos completos, y muchas veces su decadencia y desaparición (Seavoy, 1986; Devereux, 1994; Hidore, 1996; Gill, 2008). Hoy día, las sequías siguen provocando estragos en la población mundial, como lo han demostrado las recientes sequías en el Cuerno de África (2011) y en el Sahel (2012) (OMM, 2012).

A diferencia de otros desastres asociados a fenómenos naturales cuyos impactos son locales y de corto plazo (como los ocasionados por tornados, huracanes o terremotos), las sequías abarcan grandes áreas geográficas, tienen un inicio lento en la naturaleza, no tienen epicentro ni trayectorias definidas, sus daños acumulativos son no estructurales, y sus consecuencias pueden prevalecer por varios años, con un efecto negativo en la calidad de vida y en el desarrollo de las poblaciones afectadas (Wilhite, 2000). La severidad de una sequía depende no solamente del grado de reducción de la lluvia, de su duración o de su extensión geográfica, sino también de las demandas del recurso hídrico para la permanencia de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas.

Por lo anterior, se considera que la sequía es uno de los fenómenos más complejos y menos comprendidos de todos los peligros y riesgos naturales (Hagman, 1984; Wilhite y Vanyarkho, 2000). La complejidad del fenómeno propicia la creencia errónea de que después de una severa sequía, no ocurrirá otra igual o de mayores proporciones. Por ende, con frecuencia, sobre todo en los países menos desarrollados, no es usual prepararse para su ocurrencia futura (Wilhite, 1993), lo cual se debe en gran parte

[1] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, 62550 Jiutepec, Mor., México. ortega_gaucin@hotmail.com; ivelasco@tlaloc.imta.mx

Recibido: 21/01/2014
Aceptado: 17/02/2014

a que no disponen de los medios estructurales y no estructurales para afrontarla.

En las últimas décadas, en diversas partes del mundo, pareciera que las sequías son más frecuentes, persistentes y de mayores proporciones (Escalante y Reyes, 1998); además, los modelos climáticos muestran escenarios aún más severos para el siglo XXI (IPCC, 2013). En México, donde la agricultura de riego y de temporal es una fuente importante de empleo y de ingreso económico, las sequías representan un alto riesgo para el sector agropecuario, principalmente, ya que propician severos desajustes a la economía regional y nacional, como ocurrió durante la sequía más reciente de 2011-2012, "la más severa de los últimos 70 años", según apreciaciones de diversos actores (INEGI, 2011; CONAGUA, 2012; SAGARPA, 2012).

Igualmente, en México la insuficiencia de agua es factor decisivo en que poblados y regiones completas sean abandonados por la población en etapa productiva, que buscan oportunidades en otros lados, ya sea en las grandes ciudades o en el país vecino del norte (Estados Unidos de América), situaciones que frecuentemente exacerban los efectos sociales del fenómeno. Los "pueblos fantasmas", donde en el mejor de los casos quedan mujeres, niños y viejos, que viven de lo escaso que produce la tierra y de lo que reciben de los jóvenes que han emigrado, son una prueba fehaciente de los alcances y del impacto que produce la sequía (Velasco *et al.*, 2005). De hecho, existen investigaciones recientes que demuestran que cuando los rendimientos de los cultivos –principalmente el maíz– disminuyen en México como consecuencia de la sequía, la emigración de personas hacia Estados Unidos se incrementa notablemente (Feng *et al.*, 2010).

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo exponer los principales aspectos relacionados con los efectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México, para lo cual se hace un recuento de los impactos que han tenido históricamente las sequías en nuestro país. Para cumplir con este propósito, el escrito está organizado de la siguiente manera: en primer lugar se presentan algunos elementos teóricos básicos relacionados con la sequía (definición, tipos e impactos); posteriormente se incluye una narrativa de los impactos de las sequías en México, desde los tiempos antiguos hasta la actualidad; luego se presenta un apartado dedicado a analizar la vulnerabilidad actual ante las sequías en México; y finalmente se anotan las conclusiones derivadas del estudio.

DEFINICIÓN, TIPOS E IMPACTOS DE LA SEQUÍA

La definición de sequía ha sido un tema controversial ya que, debido a la desigualdad de criterios utilizados por los diversos autores, no existe una definición única que sea universalmente aceptada. Sin embargo, se reconoce, en general, que la sequía es un fenómeno natural que ocurre cuando la precipitación registrada en un período de tiempo y en una región determinada, es menor que la normal (generalmente el promedio histórico), y cuando esta deficiencia es lo suficientemente grande y prolongada como para dañar las actividades humanas y los ecosistemas (Wilhite y Glantz, 1985; Wilhite, 2000).

En la literatura se reconoce que existen diferentes tipos de sequía, los cuales están determinados por los tipos de impactos que trae como consecuencia el fenómeno. Así, se habla de sequía desde los puntos de vista meteorológico, agrícola e hidrológico (Wilhite y Glantz, 1985; Bootsma *et al.*, 1996; Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoui y Alouini, 2001; Wilhite, 2000; Boken, 2005). La sequía meteorológica se caracteriza por una ausencia prolongada, un déficit marcado o una débil distribución de precipitaciones con relación a la considerada como normal, y puede producir serios desbalances hidrológicos; la sequía agrícola es ocasionada por un déficit marcado y permanente de lluvia que reduce significativamente la producción agrícola con relación a la considerada como normal o a los valores esperados para una región dada; la sequía hidrológica hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, acuíferos, lagos, etc.) con respecto a los niveles considerados como normales. Sin embargo, los diferentes tipos de sequía son consecuencia de un déficit de precipitación o de una sequía meteorológica. Cuando ésta se prolonga, sobrevienen las sequías agrícola e hidrológica, y posteriormente surgen los impactos económicos, sociales y ambientales correspondientes, tal como se ilustra en la Figura 1.

Las causas de la sequía meteorológica, que da inicio a los demás tipos de sequías y sus impactos, se deben principalmente a la variabilidad natural del clima, aunque se acepta en general que su origen es producto una compleja interacción entre factores de tipo natural (alteraciones en los patrones de circulación atmosférica, fenómenos como *El Niño* y variaciones en la actividad solar) y antropogénico (quema de combustibles fósiles, deforestación, cambios en el uso del suelo, etc.) (Lean y Rind, 2001; Schubert *et al.*, 2004; Sheffield *et al.*, 2009).

Al fenómeno de la sequía se le conoce más por sus efectos que por sí mismo. Los impactos de primer orden que provoca se limitan en general a los de carácter físico (escasez o falta de agua) y biológico (daños en plantas y animales), mientras que los de orden superior se asocian con el daño socioeconómico, los grados de responsabilidad y los cambios o efectos a largo plazo. Por cada uno de los grandes rubros de daño, estos se clasifican en (NDMC, 2012):

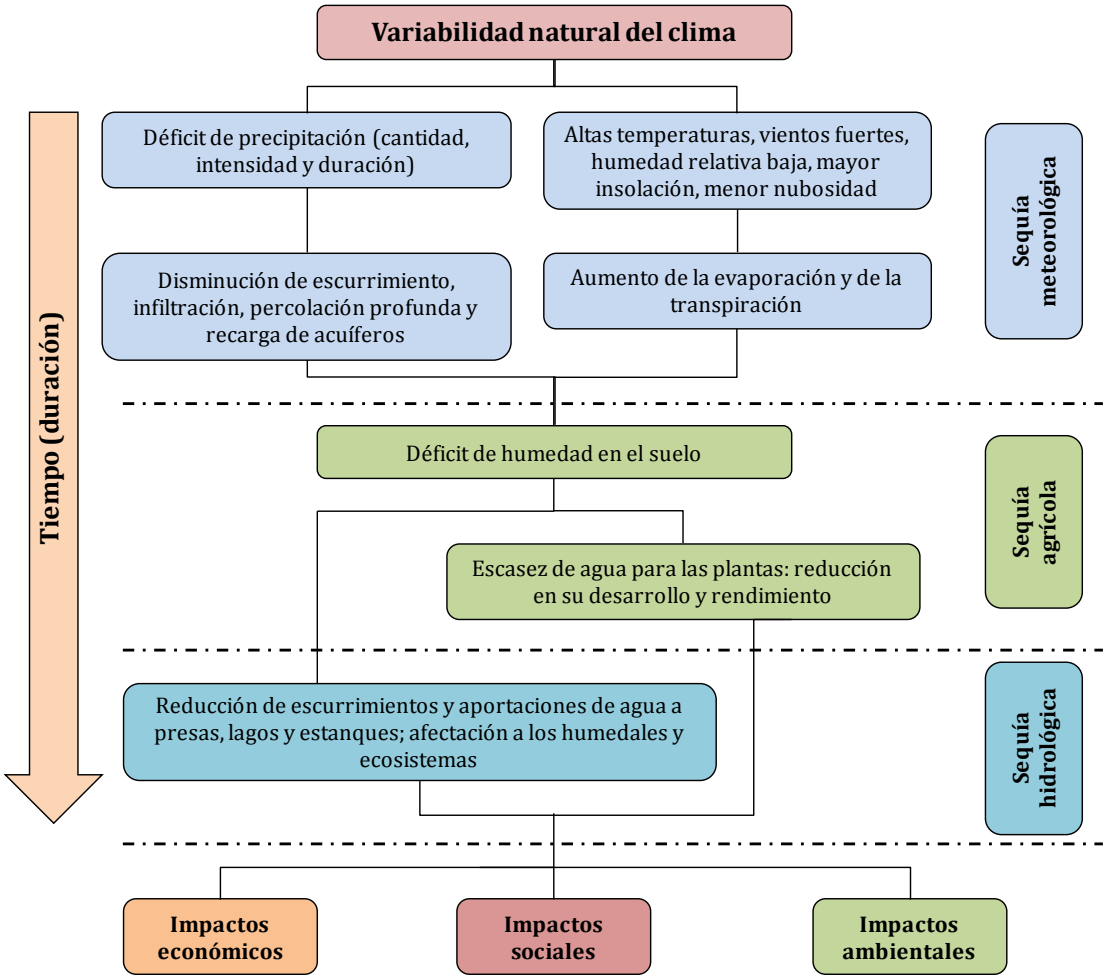


Figura 1. Secuencia de sucesos de los diferentes tipos de sequías y de sus efectos (adaptado de NDMC, 2012).

a) Impactos económicos

- pérdida de producción agrícola, pecuaria, forestal y pesquera
- recesión en la tasa de crecimiento económico regional
- pérdida de ingreso de productores, comerciantes, transportistas, etc.
- aumento en la demanda de energía
- decremento en industrias y actividades asociadas y/o dependientes
- desempleo y tirantez de créditos y actividad bancaria
- menor flujo de activos
- disminución de ingresos y beneficios vía impuestos

b) Impactos sociales

- escasez de cantidad y calidad de alimentos
- problemas de salud y aumento de morbilidad en sectores vulnerables
- conflictos entre usuarios y sectores del agua
- desigualdad en la absorción del impacto
- baja de la calidad de vida e incremento de la pobreza
- inestabilidad social, marginación y migración hacia áreas urbanas o al extranjero

c) Impactos ambientales

- daño a los ecosistemas
- incendios forestales
- pérdidas de flora y fauna silvestres
- erosión y pérdida de suelos
- degradación de la calidad del agua y del aire
- degradación del paisaje
- pérdida de servicios ecosistémicos

Los impactos totales y sectoriales dependerán de la duración y extensión territorial del fenómeno; de la cuantía de la reducción en la disponibilidad de agua; así como de las condiciones económicas tanto estructurales como coyunturales (por ejemplo, la etapa de desarrollo y los precios de los cultivos afectados, etc.).

IMPACTOS DE LAS SEQUÍAS EN MÉXICO

México es un país situado en la parte meridional de América del Norte; limita al norte con los Estados Unidos de América, al sureste con Belice y Guatemala, al oriente con el Golfo de México y el mar Caribe, y al poniente con el océano Pacífico. Está integrado por 31 entidades federativas y un Distrito Federal (D.F.), y es el décimo cuarto país más extenso del mundo, con una superficie cercana a los 2 millones de km^2 (Figura 2). Asimismo, es el undécimo país más poblado del mundo, con una población que ronda los 112 millones de habitantes (INEGI, 2010).

Figura 2. Estados de la República Mexicana con sus respectivas ciudades capitales.

Por su ubicación geográfica, México está situado en parte dentro del cinturón norte de los grandes desiertos del mundo, cuya existencia se debe fundamentalmente a la dinámica de la circulación general de la atmósfera y a particularidades que presenta la geomorfología del globo terrestre, que en conjunto producen los dos grandes cinturones de alta presión atmosférica localizados en latitudes cercanas a los 30° norte y sur, por lo que este país tiene zonas áridas (donde la precipitación anual es inferior a 350 mm) y semiáridas (donde la lluvia anual oscila entre 350 y 600 mm) principalmente en el norte, que coinciden en latitud con las regiones de los grandes desiertos africanos y asiáticos. Además, por sus características orográficas, este tipo de zonas también se localizan en el altiplano central de la República Mexicana. Si las zonas áridas y semiáridas de por sí ya tienen un déficit hídrico, ello las hace más vulnerables ante la ocurrencia de la sequía. Este factor hace que la región norte y el altiplano central en su conjunto, sufran severos desequilibrios ante las acometidas del fenómeno.

Aunado a lo anterior, en México el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) tiene grandes impactos en los patrones de variabilidad de la precipitación. De manera general, se puede decir que las lluvias de invierno se intensifican en los años en que ocurre El Niño (por ejemplo, los inviernos de 1982-83, 1986-87, 1991-92, y 1997-98) y se debilitan durante los veranos correspondientes. Lo opuesto ocurre aproximadamente durante los años en que se presenta La Niña, que es la fase fría de ENOS. En inviernos de El Niño, la corriente de chorro de latitudes medias se desplaza hacia el sur, provocando una mayor incidencia de frentes fríos y lluvias en las zonas norte y centro de México. Durante veranos de El Niño, las lluvias en la mayor parte de México disminuyen, apareciendo incluso condiciones de sequía. Por el contrario, en los años en que sucede La Niña las lluvias parecen estar por encima de lo normal en la mayor parte del país (Magaña, 2004).

Entonces, como consecuencia de las complejas interacciones entre los océanos, la atmósfera y las características geográficas y fisiográficas del país, principalmente, el problema de la sequía en México ha sido recurrente y persistente a lo largo de su historia, tal como se describe en los apartados siguientes.

Breve historia de las sequías en México

México ha padecido los efectos negativos de las sequías desde siempre, tal como lo muestran los registros documentados de las sequías ocurridas incluso desde antes de la colonización española

(Florescano, 2000; Cano y Hernández, 2007; Gill, 2008). Tláloc, el dios azteca de la lluvia, es una clara evidencia del miedo ancestral que le tenían nuestros antepasados a la falta de agua (Moreno, 2004). Textos antiguos indican que el peor azote de los pueblos fue la sequía, la cual afectaba al cultivo del maíz en dos momentos críticos: en la época de la siembra (marzo-abril), en que era indispensable la humedad para que la semilla germinara, y en el período de gestación de la mazorca (junio-septiembre), que exigía lluvias regulares y abundantes. Si la falta de lluvias ocurría en los meses de la siembra, el retraso de ésta exponía a la planta a la contingencia de las heladas tempranas, muy frecuentes en las tierras altas. Si las lluvias no llegaban en el momento de la maduración de la espiga, era seguro que se perdiera una parte considerable de la cosecha esperada. Las peores catástrofes agrícolas las ocasionaron los períodos prolongados de sequía y la conjunción de ésta con las heladas (Florescano, 2009).

El resultado de estos períodos de ausencia de lluvias era hambre, migración y muerte, que alteraba no solo la actividad agrícola sino la vida misma de las comunidades. Inclusive se cree que la causa del colapso de algunas civilizaciones prehispánicas fue la sequía. Ciertos investigadores piensan que la caída de Teotihuacán en el siglo VIII de nuestra era, se debió a un desastre natural, como un terremoto o una hambruna provocada por sequía; otros expertos proponen explicaciones más complejas: su destrucción coincidió con un cambio climático que transformó las regiones agrícolas del norte en tierras áridas y estériles, por lo que la sequía obligó a los nómadas Chichimecas a emigrar al sur (Rodríguez y MacLachlan, 2001). Por otra parte, Gill (2008) sustenta en su obra una teoría en la que afirma que la civilización Maya se colapsó como resultado de una serie de sequías devastadoras ocurridas durante los siglos IX y X de nuestra era, privándolos del vital líquido y de alimentos, pues en la antigüedad la tecnología que se tenía para captar, almacenar y extraer el agua con la que se pudiera hacer frente a la sequía era muy limitada.

Durante la época colonial (siglos XVI al XVIII) la sequía fue casi continua, de modo que sus efectos se prolongaron y se volvieron acumulativos para la población, cuya mayoría dependía de la agricultura como actividad económica. En el período independiente (siglo XIX), las sequías continuaron afectando a la agricultura debido a que en esa época sólo una parte muy pequeña de la tierra cultivada disponía de sistemas de riego; la mayoría de los cultivos se hacían en tierras de temporal. En ese siglo ocurrieron cinco grandes sequías en México, cuyos períodos y área geográfica afectada se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Grandes sequías en México durante el siglo XIX.

Años	Área geográfica afectada
1808-1811	Todo el Virreinato de la Nueva España.
1868	Estados de: Chiapas, Coahuila, Guerrero, Nuevo León, Oaxaca, Aguascalientes, México y Distrito Federal.
1877	La mayor parte del territorio nacional, especialmente el centro y norte del país.
1884-1885	Todo el territorio del país, una de las sequías mejor documentadas.
1892-1896	Todo el territorio del país, destaca el año de 1894, periodo en donde por lo menos 17 estados de la república registran promedios de lluvia por debajo del promedio anual de precipitación, posiblemente se trata de la peor sequía del siglo XIX.

Fuente: Contreras (2005).

Según el historiador Florescano (2000), la inestabilidad política, económica y social que agobió al país durante gran parte del siglo XIX, ocasionó que las sequías tuvieran efectos semejantes o más devastadores que en el periodo colonial. Una prueba de que este fenómeno tuvo un impacto fuerte sobre la política, lo representa el periodo que comprende los primeros años de la lucha de independencia, debido a que hubo una sequía severa y continúa en el Virreinato en los años de 1808 a 1811. Esta grave variación climatológica se convirtió en una gran perturbación económica que afectó a una generación que desde 1785 había vivido una serie de desastres. Fue esta generación la que se levantó en armas en 1810. La sucesión de sequías, alzas de precios, carestía y hambre desde fines del siglo XVIII, quizás coadyuvó a que la sequía de 1808 fuese el detonador de un gran malestar social latente en la sociedad colonial. El descontento de una gran parte de las masas, en lugar de manifestarse en alborotos y protestas por la carestía, encontró su detonador político en la retórica revolucionaria de Don Miguel Hidalgo y Costilla, el líder iniciador de la lucha por la independencia. La unión de ambos produjo el levantamiento de 1810. El mismo autor señala que, quizás, si no hubiese habido la gran sequía de 1808-1811, el malestar campesino y el furor popular no hubiera coincidido con la demanda política de la independencia.

Además de sus efectos sociales y económicos, las sequías ocurridas durante el siglo XIX también tuvieron repercusiones ambientales. Entre los casos mejor documentados, se encuentran los efectos que tuvo la falta de lluvia, en relación con la desecación

de los lagos cercanos a la Ciudad de México, ya que por ejemplo, durante la sequía de 1877 el vaso del lago de Texcoco casi se secó por completó; posteriormente, durante la sequía de 1884-1885, el mismo lago se volvió a secar, a tal grado que éste se había convertido en un pantano de aguas putrefactas, provocando que la atmósfera de la capital por esos años se tornara irrespirable. Igualmente, la sequía de 1892-1896 ocasionó que el vaso del lago de Chalco también se secara, situación que permitió a los pobladores del lugar solicitar al gobierno central permiso para convertir este sitio en tierras agrícolas (Contreras, 2005).

A principios del siglo XX, en la última década del Porfiriato, la sequía se hizo presente en casi todo el territorio nacional, pero particularmente en la región norte del país, que fue el semillero donde se gestó la Revolución de 1910. Si bien los hechos políticos fueron los factores que desencadenaron dicho movimiento civil, la sequía también tuvo participación, pues al agravar la situación miserable del campo impulsó a los campesinos a la lucha. Cientos y miles de campesinos dejaron sus parcelas empobrecidas y se incorporaron a los ejércitos o se fueron a los cerros para formar bandas de guerrilleros (Escobar, 1997; Florescano, 2000).

A lo largo del siglo XX, hubo una tendencia creciente a la ocurrencia de sequías en México y en el mundo, la cual se prolongó hasta la década de los setenta, de modo que la producción agrícola disminuyó justo en el momento en que la población mundial aumentaba su tasa de crecimiento. El resultado de esta tendencia fue la deficiencia alimentaria y la ocurrencia de hambrunas en muchos países. A partir de la década de 1980, México pasó de ser un país exportador de granos, a ser uno de los mayores importadores de maíz (Castorena, 1980). A pesar de la Revolución Industrial y de los adelantos técnicos acumulados a lo largo de los últimos dos siglos, y a pesar de la Reforma Agraria, la economía siguió sufriendo los estragos de la sequía y de la falta de previsión y planeación.

Los estados del territorio nacional que históricamente han sido afectados por las sequías y donde se presenta con mayor frecuencia el fenómeno están ubicados en el norte. Sin embargo, en orden de severidad de sus efectos desfavorables se encuentran: Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Baja California, Sonora, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo y Tlaxcala (CENAPRED, 2001). En la Figura 3 se muestran los estados de la república que históricamente han sido afectados por las sequías (períodos secos más importantes ocurridos durante el siglo XX, entre 1948 y 1996), donde se indica el grado de severidad con que se han presentado en cada entidad federativa.

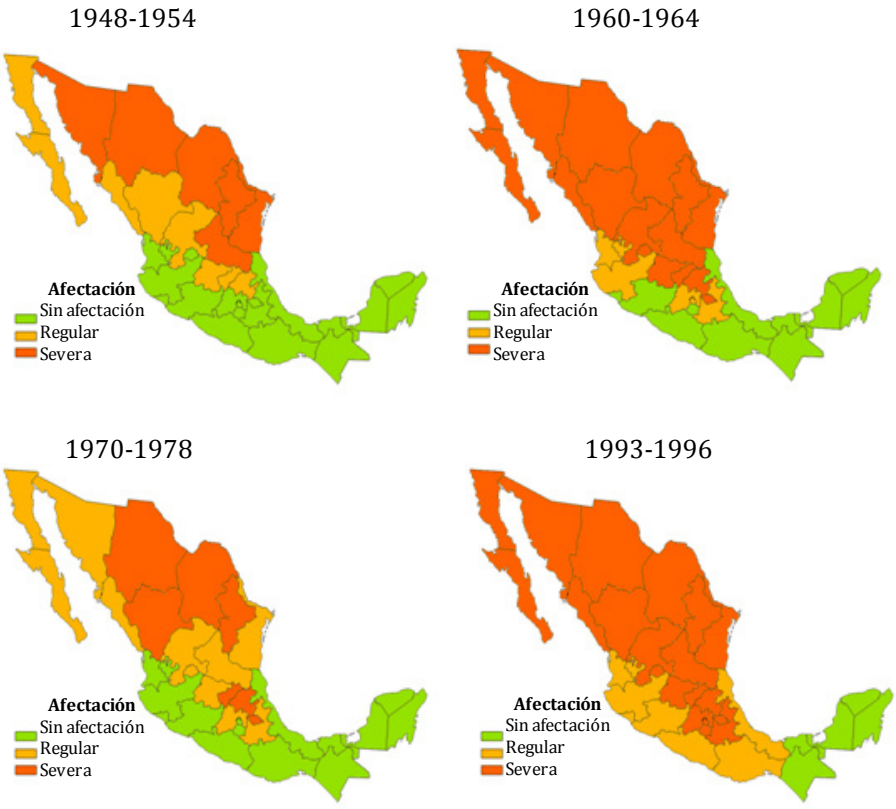


Figura 3. Estados de la república mexicana afectados en diferentes períodos de sequía (adaptado de CENAPRED, 2001).

Impactos de las sequías en el México moderno

En el México moderno, desde finales del siglo XX y principios del actual, han ocurrido varios años deficitarios de lluvias, principalmente en el norte del país. Por ejemplo, en la cuenca del río Bravo, una de las más importantes de México por su extensión territorial y su estratégica ubicación geográfica, ocurrió un periodo de sequía hidrológica extraordinaria que se extendió prácticamente a lo largo de 13 años consecutivos (1993-2005), y fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro (Ortega-Gaucin, 2013). Este período seco afectó principalmente a los distritos y unidades de riego que se ubican en los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, y tuvo importantes repercusiones económicas y sociales en la región. Además, la escasez de agua generó diversas controversias locales, regionales e incluso internacionales, dado que México se vio imposibilitado durante varios años para entregar a los Estados Unidos los volúmenes de agua del río Bravo que estipula el "Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América", suscrito en 1944.

La Figura 4 muestra la evolución y el porcentaje de área del país afectada con una o varias categorías de sequía durante el período de enero de 2003 a enero de 2014. Esta gráfica es elaborada y actualizada de manera permanente por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con base en la información generada por el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, por sus siglas en inglés), el cual es un esfuerzo de cooperación entre expertos de Canadá, México y Estados Unidos y ha sido desarrollado para proporcionar una evaluación continua, completa e integrada de la sequía, de forma permanente para los tres países (Lawrimore *et al.,* 2002). En esta figura se puede observar que las sequías en México han sido recurrentes durante la última década, aunque no es posible determinar con precisión un patrón definido o una tendencia predecible.

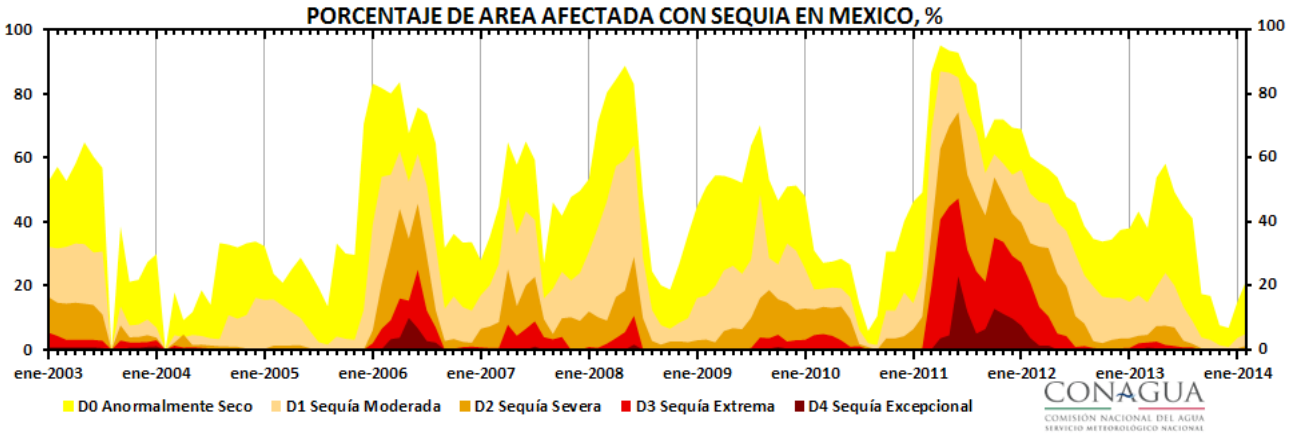


Figura 4. Área afectada por sequía en México en el período de enero de 2003 a enero de 2014 (CONAGUA/SMN, 2014).

Oficialmente se reconoce que en el año 2009 se presentó en México la segunda peor sequía en 60 años; que el año 2010 fue el más lluvioso del que se tenga registro y que, en el 2011, 40% del territorio mexicano registró la peor sequía de las últimas siete décadas. Las cifras de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2012) revelan que en el año agrícola 2010-2011 sumaron 2.7 millones las hectáreas siniestradas en siete de los principales cultivos, sobre todo en Sinaloa, Zacatecas y Guanajuato, estados del noroeste, norte y centro del país, respectivamente.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012) corroboró este fenómeno en 1.213 municipios de México, lo que permitió aprobar la declaratoria de emergencia por desastre natural en 1.174 de éstos (96.7%). A nivel de entidades federativas, 19 de los 32 estados de la República sufrieron los efectos de la peor sequía en décadas, entre los que destacan Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas. Por su parte, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2012), informó que 64 de las 174 áreas naturales protegidas en México (36.8%), se encontraban en riesgo por la sequía que afectaba al país y que ya era considerada como la más severa de los últimos 70 años.

En el 2011, México sufrió uno de los peores años en cuanto a incendios forestales. Coahuila, entidad ubicada en el norte del país, fue de las más afectadas, con alrededor de 425 mil hectáreas de bosques y matorrales quemadas. En el 2012 gran parte de la República Mexicana todavía enfrentaba los estragos de una sequía que comenzó a gestarse a finales del año 2010 y cuyos efectos negativos siguen vigentes. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2011) como resultado de las escasas precipitaciones que se presentaron desde octubre del 2010 hasta mayo de 2011, la sequía se incrementó gradualmente; en noviembre de 2010 el 12.2% de

la superficie total del país padecía los efectos de algún tipo de sequía (desde sequía moderada hasta sequía extrema), y para junio de 2011 esta superficie se incrementó significativamente hasta cubrir cerca del 86% del territorio nacional (Figura 5). El año 2011 terminó siendo el décimo tercer año más seco en la historia de México desde los últimos 70 años.

En un informe extraoficial del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) publicado en el mes de abril de 2012, se afirma que México durante el año 2011 vivió la peor sequía en siete décadas, la cual generó pérdidas económicas en la producción agrícola que superan los 16 mil millones de pesos (un mil 300 millones de dólares). Según el informe, la prolongada sequía había afectado a un 70% del país y había diezmado a la agricultura en los estados norteños de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Durango, así como Zacatecas y Aguascalientes. Entre las pérdidas se incluyen 9 mil millones de pesos (710 millones de dólares) en cultivos de maíz y 6 mil millones de pesos (280 millones de dólares) en frijoles (*La Jornada*, 4 de abril de 2012).

Por su parte, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) estimó que las pérdidas en México durante el año 2011 por la peor sequía en 70 años equivalieron al 10% del producto interno bruto (PIB) nacional, y calculó que alrededor de 48 millones de mexicanos padecieron las consecuencias de la sequía en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, siendo un problema que afectó a dos de cada tres hectáreas cultivadas (*La Crónica*, 17 de junio de 2012).

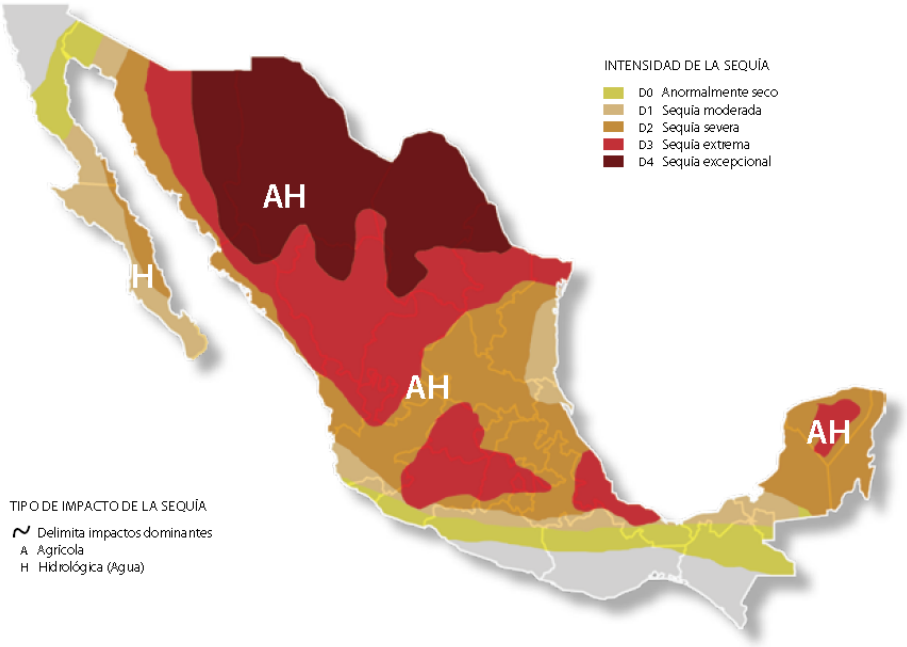


Figura 5. Regiones del país afectadas por sequía durante el mes de junio de 2011 (adaptado de CONAGUA/SMN, 2011)

Ante esta situación, a principios de 2012 el Gobierno Federal de México a través de la CONAGUA, ordenó liberar 33.827 millones de pesos (unos 2.500 millones de dólares) para atender el escenario de sequía que afectaba al país, sobre todo en los estados del centro y norte. Los recursos gubernamentales fueron asignados particularmente a la rehabilitación y el reforzamiento de la infraestructura para el suministro de agua destinada al consumo humano, y para garantizar el abasto de alimentos a las poblaciones afectadas por la sequía.

Cuando ocurre una sequía severa, como sucedió en el año 2011, la primera reacción de los gobiernos de los estados afectados es la de solicitar la declaratoria de desastre natural por sequía ante la CONAGUA, con lo cual tienen acceso a los tradicionales apoyos federales del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN). Este fondo fue establecido a finales de los años 90's como un mecanismo presupuestario para apoyar a la rehabilitación de la infraestructura federal y estatal afectada por desastres naturales, y aunque ha sido una buena fuente de financiamiento para atender las necesidades de emergencia causadas por sequía y otros desastres naturales a corto plazo, no es totalmente adecuado o suficiente como una estrategia integral para gestionar el riesgo de una sequía prolongada y generalizada, como la que ocurrió recientemente en el país.

Igualmente, ante la emergencia causada por sequía, los gobiernos estatales tienden a implementar diversos "programas emergentes" de apoyo humanitario y agropecuario, entre los que destacan, por ejemplo, los siguientes: reparto de agua y despensas entre la población rural; apoyo para suplemento alimenticio

del ganado; entrega de cheques o dinero en efectivo a los afectados; etc., los cuales no tienen un propósito de largo alcance bien definido y, por ende, no están diseñados como planes integrales con estrategias específicas que sean replicables en eventos futuros de sequía. La sequía se administra actualmente en México como un desastre natural, al igual que las inundaciones o los huracanes; pero los efectos de las sequías distan mucho de ser similares a los causados por otros desastres naturales, por lo que requieren un tratamiento específico para su atención. Entonces, es necesario realizar una evaluación integral de los riesgos y contar con un sistema de monitoreo y alerta temprana, así como disponer de planes integrales de prevención y mitigación de sequías, que permitan reducir considerablemente los tiempos de respuesta y los costos incurridos en los daños y pérdidas innecesarias que pueden evitarse en gran medida. En otras palabras, es necesario gestionar los riesgos, no sólo los desastres (Ortega-Gaucin, 2012).

Finalmente, se debe considerar que aunque la última sequía en México se puede atribuir en su mayor parte a la variabilidad climática natural, hay que tener en cuenta que los efectos del cambio climático global se irán sumando a los causados por esta variabilidad como lo demuestran estudios científicos realizados en los últimos años (por ejemplo, Martínez-Austria, 2007). En consecuencia, se estima que esta clase de escenarios se presenten cada vez con mayor frecuencia y, por ende, despierten mayor interés en la población y en las autoridades gubernamentales.

VULNERABILIDAD ACTUAL ANTE LAS SEQUÍAS EN MÉXICO

Existen diversos factores físicos, socioeconómicos y ambientales que hacen que la población de un estado, país o región sea más o menos vulnerable al acontecimiento de un peligro o desastre de origen natural como puede ser una sequía severa y prolongada. La vulnerabilidad ante las sequías está en relación inversa al grado de desarrollo social y económico de las áreas afectadas: en tanto que para los países más desarrollados la sequía rara vez representa una amenaza severa, debido a que disponen de los medios económicos, estructurales y no estructurales para afrontarla; en los de menor desarrollo una sequía es frecuentemente sinónimo de hambre, desastre y más pobreza, situaciones en las que los habitantes difícilmente poseen elementos para mitigar los estragos. Por supuesto, existen áreas más vulnerables ante las sequías, que además de definirse por su situación geográfica, también están caracterizadas por la densidad demográfica y la intensidad de la actividad económica, es decir, por la relación oferta-demanda de agua (Postel, 1992).

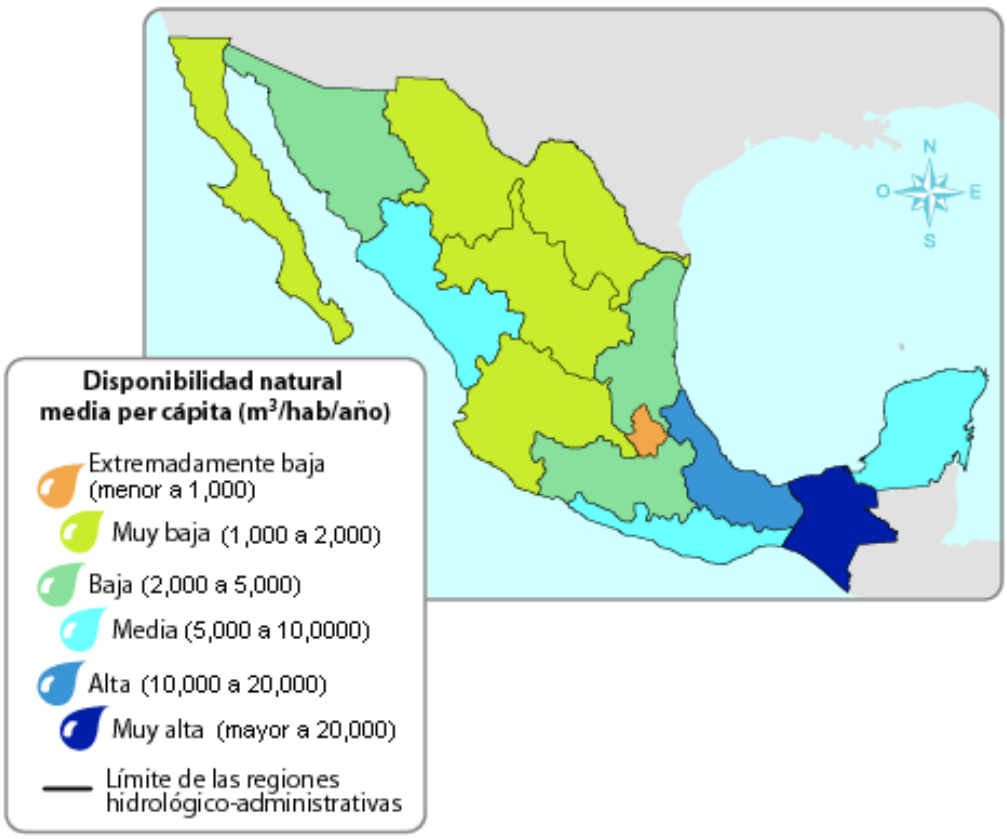


Figura 6. Agua disponible *per cápita* en México, en m³/hab/año (SEMARNAT, 2008).

En la actualidad, México, como país, está clasificado como de disponibilidad baja de agua (alrededor de 4.200 m^3/habitante/año), y en el contexto mundial, la disponibilidad de agua por habitante en nuestro país es mucho menor que la de países como Canadá (91.420 m^3/hab/año), Brasil (45.570 m^3/hab/año) o Estados Unidos (10.270 m^3/hab/año), y en general toda América del Sur, pero ligeramente superior al promedio de los países europeos. La realidad es que dada la gran variedad de entornos naturales y su combinación con los factores humanos, esta distribución tiene grandes variaciones espaciales (Figura 6), que cuando se combinan con las temporales, hacen del país todo un mosaico de posibilidades, y frecuentemente de condiciones adversas.

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), para garantizar el bienestar de la población, la disponibilidad de agua debería ser mayor a 1.000 m^3/hab/año. La disponibilidad más baja del país es en el Valle de México, donde se ubica la capital de la república y se tienen menos de 1.000 m^3/hab/año. Si a este hecho se le adiciona la tendencia a la disminución en la disponibilidad unitaria, y las cada vez más amplias variaciones en el clima natural, el resultado es que, como país, el futuro será más restrictivo y complejo en materia de agua, tanto en calidad como en cantidad. Regiones como el Valle de México, la cuenca de los ríos Lerma, Bravo, Nazas, y la Península de Baja California, se perfilan como zonas de mayores conflictos y de severas restricciones hídricas.

Además de lo anterior, debe tenerse en cuenta que el nivel tecnológico de nuestro país, así como también el nivel organizativo, institucional y social, son elementos clave en la vulnerabilidad ante la sequía. Una muestra clara de la diferencia en la vulnerabilidad entre México y Estados Unidos, por ejemplo, se observa entre los campesinos mexicanos y los granjeros estadounidenses que viven en la frontera entre ambos países, con condiciones biológicas y físicas similares pero con características sociales, políticas, económicas e históricas diferentes (Vásquez-León *et al.*, 2003). Evidentemente, los primeros son más vulnerables que los segundos.

Para caracterizar el nivel de vulnerabilidad actual ante las sequías en México, a escala regional y local, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012) efectuó recientemente un estudio con este propósito, para lo cual adaptó la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático (IPCC, 2007). De acuerdo con los resultados de este estudio, se determinaron cuatro niveles de vulnerabilidad (muy baja, baja, media, alta y muy alta) para cada una de las 168 células de planeación en que ha sido dividido el país, tal como se ilustra en la Figura 7.

En esencia, en México existen básicamente cuatro regiones con muy alta vulnerabilidad ante las sequías:

1. **La zona metropolita de la ciudad de México.** Por tener la concentración de población más grande del país (más de 20 millones de habitantes, que equivalen casi al 18% del total) representa la región más vulnerable, dada su importancia en la contribución al PIB nacional (más del 20%) y la dificultad ambiental de solventar la creciente demanda de agua.
2. **El norte de Sinaloa.** Esta región presenta una precipitación media anual de aproximadamente 570 mm, menor al promedio nacional de 760 mm. Sin embargo, allí se ubican algunos de los distritos de riego más productivos de México (063 Guasave, 075 Río Fuerte y 076 Valle del Carrizo), con una superficie total del orden de 380 mil hectáreas. La presencia de una sequía en esta región afectaría seriamente la producción de alimentos, cuyo efecto adverso se vería reflejado en la carencia de granos básicos en el resto del país.
3. **La cuenca del río Conchos.** Esta cuenca se ubica en su mayor parte en el estado norteño de Chihuahua y abarca aproximadamente 67.000 km^2, siendo la más importante dentro de la región hidrológica del río Bravo. El río Conchos es uno de los más importantes del norte de México y es la principal corriente superficial del árido estado de Chihuahua. Con una precipitación media anual de 363 mm, esta región es propensa a frecuentes sequías que reducen periódicamente los niveles de las presas y es por ello que los acuíferos presentan un alto grado de explotación, principalmente en las zonas bajo riego. Debido al cambio climático, se estima que para el año 2030 los decrementos en los volúmenes de escurrimiento medio anual sean del orden del 20%, con lo cual es de esperarse que aumente la frecuencia de las sequías. La ciudad de Chihuahua merece especial atención dado que depende del agua subterránea para satisfacer el 92% de sus necesidades.
4. **La región de El Bajío.** Esta región geográfica se ubica en el centro-norte del país y comprende los territorios no montañosos de los estados de Querétaro, Guanajuato, Aguascalientes y Jalisco. Las principales ciudades de la región (León, Guanajuato, Salamanca, Celaya y Querétaro) se ubican sobre acuíferos sobrexplotados. Con una precipitación media anual de 550 mm, los escurrimientos superficiales no han sido suficientes para satisfacer la demanda de agua de las crecientes actividades industriales y domésticas de este corredor industrial y por ello se han abatido los mantos freáticos. Por otra parte, las corrientes superficiales se encuentran altamente contaminadas por las descargas industriales.

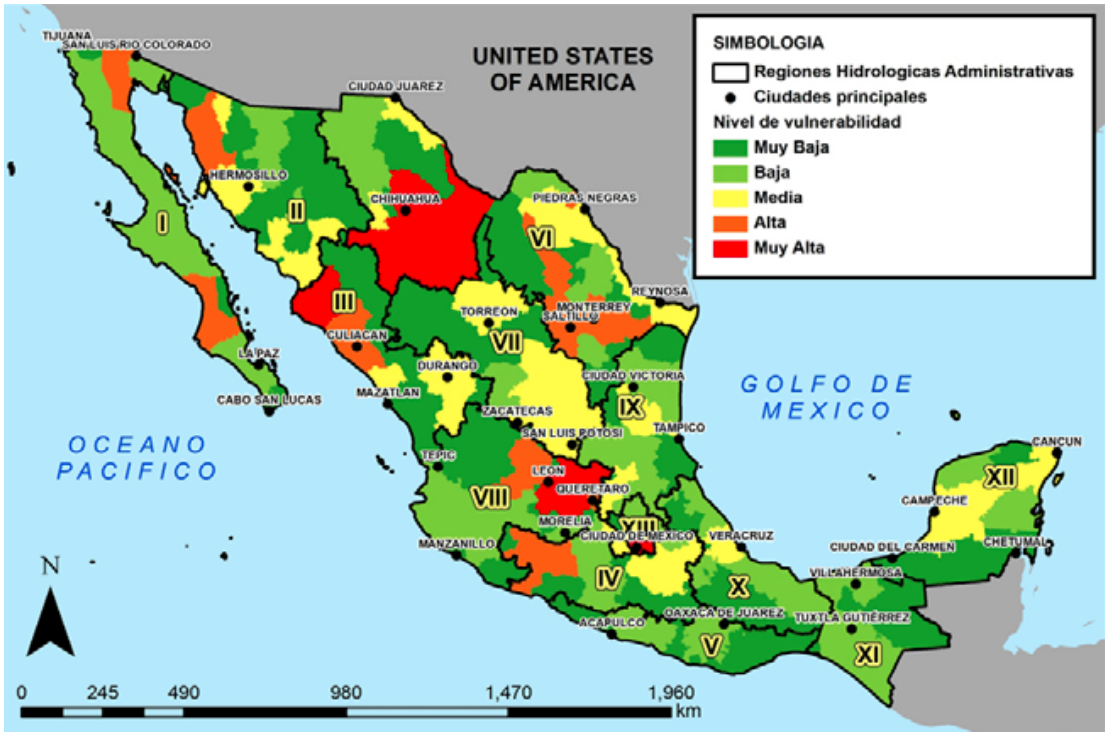


Figura 7. Mapa del nivel de vulnerabilidad ante las sequías en México (CONAGUA, 2012).

Las cuatro regiones anteriores representan las áreas más críticas, sin embargo, otras regiones vulnerables son la zona metropolitana de Monterrey, en el estado de Nuevo León, y el centro de Sinaloa.

CONCLUSIONES

La sequía es un riesgo insidioso de la naturaleza que puede provocar severos impactos negativos en los diversos sectores productivos y económicos de una región o país, siendo capaz de alterar dramáticamente el desarrollo social y las actividades humanas, así como el medio ambiente. En el caso de México, los impactos de las sequías se han manifestado desde la antigüedad hasta nuestros días y han afectado a los distintos sectores socioeconómicos, pero sobre todo al sector agropecuario y a la población rural que vive de lo poco que producen las tierras de temporal. Asimismo, los efectos de las sequías han tenido un carácter altamente social: han sido la causa de desempleo, migraciones y hambrunas, y han influido –en conjunción con otros problemas de índole político y social– en el desencadenamiento de conflictos civiles armados como el movimiento insurgente de 1810 y la revolución de 1910.

No obstante, a pesar de la importancia que han tenido las sequías en la historia de México y de los impactos negativos que siguen causando en la actualidad, la atención a este fenómeno en las últimas décadas se ha basado en un enfoque reactivo, donde lo primordial ha sido el alivio de las crisis provocadas por la sequía y no la gestión del riesgo, por lo que la población y los diversos sectores socioeconómicos de ciertas áreas del país (sobre todo en el norte y centro), siguen siendo altamente vulnerables ante los embates del fenómeno.

Sin embargo, afortunadamente en México ya se están dando las primeras señales de cambio en el enfoque dado en la atención a las sequías, con la puesta en marcha a partir del año 2013 del Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), el cual tiene como objetivo llevar a cabo una serie de acciones preventivas y de mitigación con el propósito de reducir la vulnerabilidad de la población ante la sequía. Entonces, es de esperarse que estas acciones iniciadas por el gobierno federal, en conjunto con la participación activa de la sociedad civil organizada, tengan sus frutos en el mediano plazo.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo otorgado para la realización de este trabajo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del Programa de Apoyos Complementarios para la Consolidación Institucional de Grupos de Investigación.

REFERENCIAS

Barakat, F., y A. Handoufe, 1998. Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse*, vol. 3, p. 201–208.

Bergaoui, M., y A. Alouini, 2001. Carctésisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: cas du Bassin Versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse*, vol. 4, p. 205–213.

Boken, V. K., 2005. Agricultural drought and its monitoring and prediction: some concepts. *Monitoring and predicting agricultural drought: a global study.* Vijendra K. Boken, Arthur P. Cracknell y Ronald L. Heathcote (Eds.). Oxford University Press, EUA. pp. 3-10.

Bootsma, A., J. Boisvert, y R. Baier, 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne: une revue des moyens d'action. *Sécheresse*, vol. 4, p. 277–285.

Cano, L., y G. Hernández, 2007. *Las sequías en México*. IMTA. Consultado en línea el 12 de abril de 2012 desde: http://www.imta.mx/

Castorena, G., 1980. Las sequías en el siglo XX. *Análisis Histórico de las Sequías en México,* SRH–Comisión Nacional Hidráulica, p. 59–61.

Devereux, S., 1994. *Theories of famine*. Harvester Wheatsheaf, USA. 208 p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2012. Sitio web oficial de la Comisión Nacional del Agua. Consultado en línea el 23 de mayo de 2012 desde: http://www.conagua.gob.mx/

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012. Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante las sequías en México. SEMARNAT. México, D.F. 43 pp.

CONAGUA/SMN (Comisión Nacional del Agua/Servicio Meteorológico Nacional), 2014. *Seguimiento mensual de afectación por sequía*. Consultado en línea el 12 de marzo de 2014 desde: http://smn.cna.gob.mx/

Contreras, C. S., 2005. Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, no. 56, pp. 118-133.

CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2001. *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México.* Secretaría de Gobernación, 226 p.

Escalante, C. y L. Reyes, 1998. Identificación y análisis de las sequías en la región hidrológica número 10, Sinaloa. Ingeniería Hidráulica en México, vol. 2, p. 23–43.

Escobar O., A. 1997. Las sequías y sus impactos en el México decimonónico, 1856-1900. *Historia y Desastres en América Latina*, V. García A. (Coord.), vol. 2, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Perú. pp. 170-202.

Feng, S., A. B. Krueger y M. Oppenheimer, 2010. Linkages among climate change, crop yields and Mexico-US cross-border migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 32, pp. 14257-14262.

Florescano, E., 2000. *Breve historia de la sequía en México.* 2ª ed., CONACULTA, 252 p.

Florescano, E., 2009. Una historia olvidada: la sequía en México (agosto 1980). *Nexos*, 1 de octubre, consultado en línea desde: http://www.nexos.com.mx/

Gill, R. B., 2008. *Las grandes sequías mayas. Agua, vida y muerte.* 1ª ed. en español, Trad. M. O. Arruti y Hernández, FCE, 562 p.

Hagman, G., 1984. *Prevention better than cure.* Swedish Red Cross, Stockholm, p. 1–134.

Hidore, J. J., 1996. *Global environmental change: its nature and impact*. Prentice Hall, New Jersey, 263 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2010. *Censo de población y vivienda 2010*. Consultado en línea desde: http://www.inegi.org.mx/

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2011. *Estadísticas a propósito del día mundial contra la desertificación y la sequía.* Consultado en línea desde: http://www.inegi.org.mx/

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), 2007. *Cambio climático 2007: impacto, adaptación y vulnerabilidad.* OMM/PNUMA, Ginebra, Suiza. 103 p.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), 2013. *Cambio climático 2013: bases físicas. Resumen para responsables de políticas*. OMM/PNUMA, Ginebra, Suiza. 27 p.

Lawrimore, J., 2002. Beginning a new era of drought monitoring across North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, p. 1191–1192.

Leand, J. y Rind, D., 2001. Earth's Response to a Variable Sun. *Science*, vol. 292, p. 234-236.

Martínez-Austria, P., 2007. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. IMTA. 58 p.

Magaña R., V. (Ed.), 2004. *Los impactos del Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México/ Secretaría de Gobernación. México, D.F. 229 p.

Moreno, P., 2004. *Nubes ausentes: las sequías.* Planeta Mexicana, 16 p.

NDMC (National Drought Mitigation Center), 2012. Sitio web oficial del National Drought Mitigation Center. Consultado en línea el 4 de julio de 2012 desde: http://drought.unl.edu

OMM (Organización Meteorológica Mundial), 2012. Reunión de alto nivel de políticas nacionales sobre la sequía. Documento de política: política nacional de gestión de sequías. UNCD/FAO/OMM. Ginebra, Suiza. 5 p.

ONU (Organización de las Naciones Unidas), 1996. *Convención de las Naciones Unidas contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África*. Consultado en línea el 6 de junio de 2012 desde: http://www.iisd.ca/

Ortega-Gaucin, D., 2012. *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación.* Instituto del Agua del Estado de Nuevo León, 222 p.

Ortega-Gaucin, D., 2013. Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México. *Terra Latinoamericana*, vol. 31, no. 3, p. 167-180.

Postel, S., 1992. *The last oasis. Facing water scarcity.* Worldwatch Institute, 241 p.

Rodríguez O., J. E. y MacLachlan, C. M., 2001. *Hacía el ser histórico de México. Una reinterpretación de la Nueva España.* Diana, 376 p.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación), 2012. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Consultado en línea el 23 de junio de 2012 desde: http://www.sagarpa.gob.mx/

Schubert, S. D., M. J. Suarez, P. J. Pegion, R. D. Koster y J. T. Bacmeister, 2004. Causes of long-term drought in the U.S. Great Plains. *Journal of Climate*, vol. 17, no. 3, pp. 485-503.

Seavoy, R., 1986. Famine in peasant societies. Greenwood Press, USA. 478 p.

Sheffield, J., K. M. Andreadis, E. F. Wood y D. P. Lettenmaier, 2009. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity–area–duration analysis and temporal variability of large-scale events. *Journal of Climate*, vol. 22, no. 8, pp. 1962-1981.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2008. ¿Y el *medio ambiente? Problemas en México y el mundo.* SEMARNAT. 193 p.

Vásquez-León, M., C. T. West, and T. J. Finan, 2003. A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US-Mexico border. *Global Environmental Change*, vol. 3, p. 159–173.

Velasco, I., L. Ochoa y C. Gutiérrez, 2005. Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y Sociedad*, vol. XVII, no. 34, pp. 35-71.

Wilhite, D. A., 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions**.** *Drought: a global assessment*, D. A. Wilhite (Ed.), Routledge, vol. 1, p. 3–18.

Wilhite, D. A., 1993. *Preparing for drought: a guidebook for developing countries*. UNEP, 78 p.

Wilhite, D. A., and M. H. Glantz, 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, vol. 3, p. 111–120.

Wilhite, D. A., and O. Vanyarkho, 2000. Drought: pervasive impacts of a creeping phenomenon. *Drought: a global assessment*, D. A. Wilhite (Ed.), Routledge, vol. 1, p. 245–255.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinar que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social.

Las contribuciones deben ser el resultado de una investigación original adecuadamente diseñada y que contenga un **título, resumen, palabras clave, introducción, metodología, resultados y discusión, conclusiones o consideraciones finales, agradecimientos (opcional)** y **referencias bibliográficas.** Los artículos presentados deben ser originales en idioma español o inglés y escritos a espacio sencillo, con letra Arial tamaño 10 y márgenes de 2 cm. y de una extensión de entre 8-15 páginas, contando inclusive aquellas con tablas y figuras.

Formato

Primera página: Incluirá el titulo en español e inglés, que debe ser conciso y reflejar el contenido del trabajo, los nombres de los autores, así como su afiliación (nombre de la institución a la que pertenece y correo electrónico). Siempre que aparezcan nombres científicos en el título, estos deberán ser escritos de acuerdo a los registrados en **ITIS** (Sistema de Información Taxonómico Integrado**,** http://www.itis.usda.gov/) siempre y cuando se encuentren disponibles.

Resumen: Los trabajos deben incluir un resumen representativo del artículo, en el idioma original del texto y en el otro idioma oficial de la revista. Se requiere además de 3-6 palabras clave en ambos idiomas separadas por comas que permitirán ubicar el trabajo en las bases internacionales de datos que incluirán a la revista.

Texto

Tendrá que ser consistente con el tipo de publicación, siguiendo la estructura estándar presentada en la matriz disponible en el sitio web de Aqua-LAC.

Referencias

Las referencias que aparecen en el texto deben estar presentes en la sección Referencias Bibliográficas en orden alfabético y cronológico. Solo los trabajos citados en el texto deberán aparecer en la sección de Referencias Bibliográficas y viceversa.

Figuras y Tablas

Se prefieren figuras, dibujos y fotografías electrónicas en formato GPS o TIFF, de 300 DPI (color) y 1200 DPI (blanco y negro).

Las figuras, ilustraciones y fotografías digitales deben ser enviadas en forma separada, debidamente identificadas conteniendo un número que deberá ser consistente con su aparición en el manuscrito y con una breve descripción.

Las tablas deben ser enviadas por separado, enumeradas y con un título, que aparecerá en la parte superior de la misma. Deberán estar citadas en el texto en un orden ascendente de numeración a medida que son descritas, preferiblemente no debiendo exceder un máximo del 50% del tamaño de la página. NOTA: Las tablas deben utilizar el Sistema Internacional de unidades

Remisión de Trabajos

Los autores deberán enviar sus trabajos en solamente en formato electrónico a aqualac@unesco.org.uy.

Derechos de autor

Los autores de manuscritos aceptados para publicación en la revista de forma automática dan su consentimiento para que los derechos de autor sean transferidos a la Revista.

NOTA: Descargue las instrucciones en versión extendida en www.unesco.org.uy/phi/aqualac

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The Aqua-LAC journal is a multidisciplinary publication that will contain articles, technical notes and water resources reviews, as much in a scientific as in an economic and social dimension.

The articles must be the result of an original research, dully designed and containing **title**, **abstract**, **key words**, **introduction, materials and methods**, **results**, **conclusions**, **acknowledgments (optional),** and **bibliographic references**. The manuscripts presented will be originals in Spanish or English, on subjects related to the areas of the journal. Will be written with Arial font size 10 pt, with single spacing, 2 cm margins, and with a length between 8 and 15 pages including tables and illustrations.

Format

First page: will include the title in Spanish and English, that should be concise reflecting the content of the document, the authors names and their affiliation (name to their belonging institution, telephone, fax and e-mail). If scientific names appear in the title, this should be written according with those in ITIS (Integrated Taxonomic Information System, http://www.itis.usda.gov/) if they are available.

Abstract: the articles must include a representative abstract, in the language of the paper and in the other official language of the journal. Also, 3-6 key words in both languages will be requested, separated by commas to allow finding the manuscript in the international databases including the journal.

Text

Shall be consistent with the type of journal, following the standard format presented in the template provided in the Aqua-LAC web-page.

References

References that appear in the text should be presented in the Bibliographic References section in alphabetical and chronological order. Only works cited in the text should appear in the References section and viceversa.

Tables and Figures

Figures, drawings and digital photos are preferable in GPS or TIFF, 300 DPI (colour) and 1200 DPI (black and white).

The figures, illustrations and digital photos should be sent separately, properly identified with a number that should be consistent with the way they are mentioned in the manuscript and a short description.

The tables should be sent separately, numbered and with a title that will be shown on its upper part. In the text the tables should be cited with a rising numeration order according to its description, preferably not exceeding a maximum of 50% of the size of the page.

NOTE: The tables should use the International Units System.

Submission of manuscript

Manuscripts must be submitted only in electronic format to aqualac@unesco.org.uy.

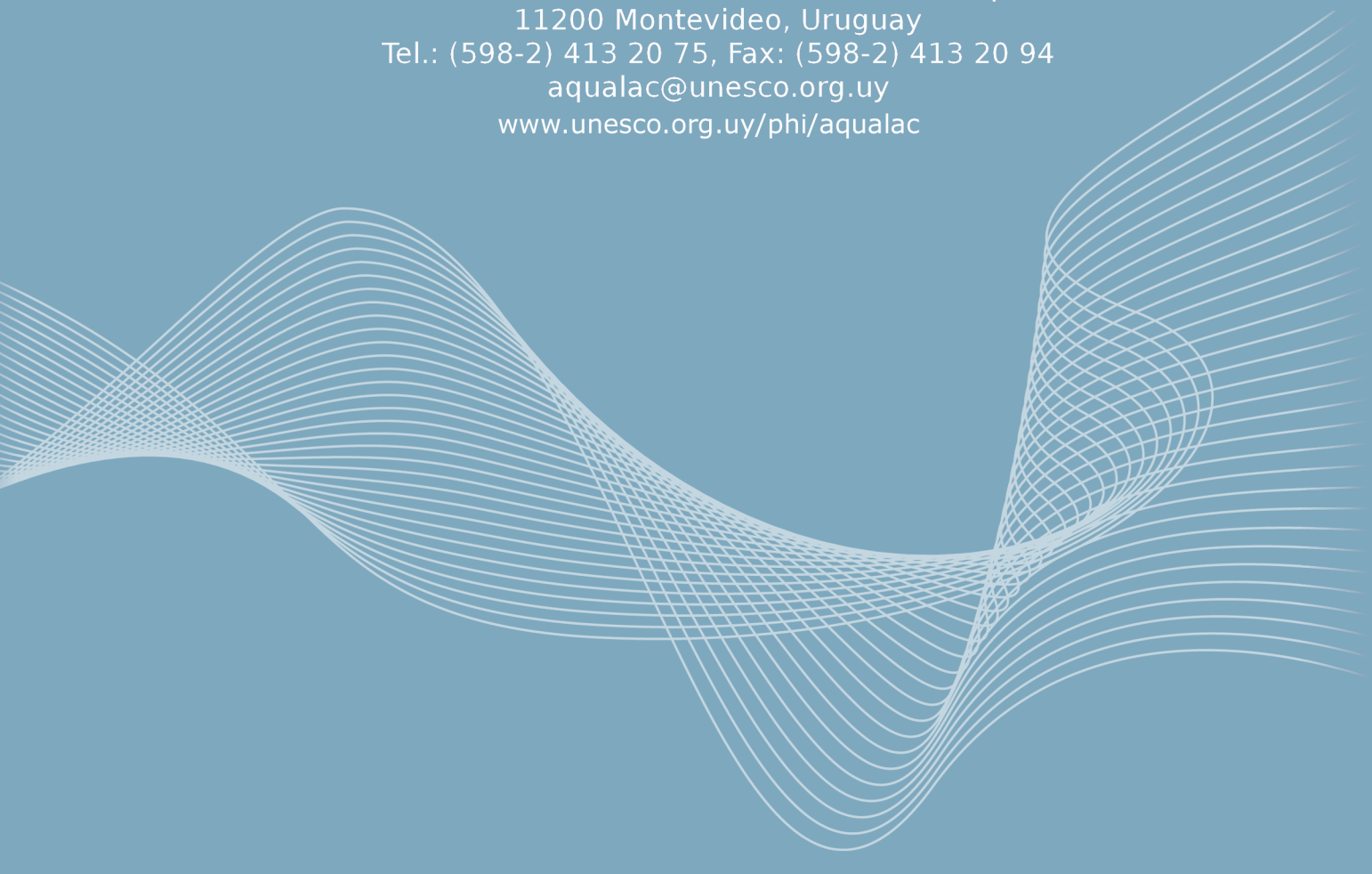
Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree for the author's rights to be transferred to the Journal.

NOTE: Download the extended instructions from www.unesco.org.uy/phi/aqualac

UNESCO

Programa Hidrológico Internacional
Oficina Regional de Ciencia
para América Latina y el Caribe

International Hydrological Programme
Regional Office for Science
for Latin America and the Caribbean

Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: (598-2) 413 20 75, Fax: (598-2) 413 20 94
aqualac@unesco.org.uy
www.unesco.org.uy/phi/aqualac