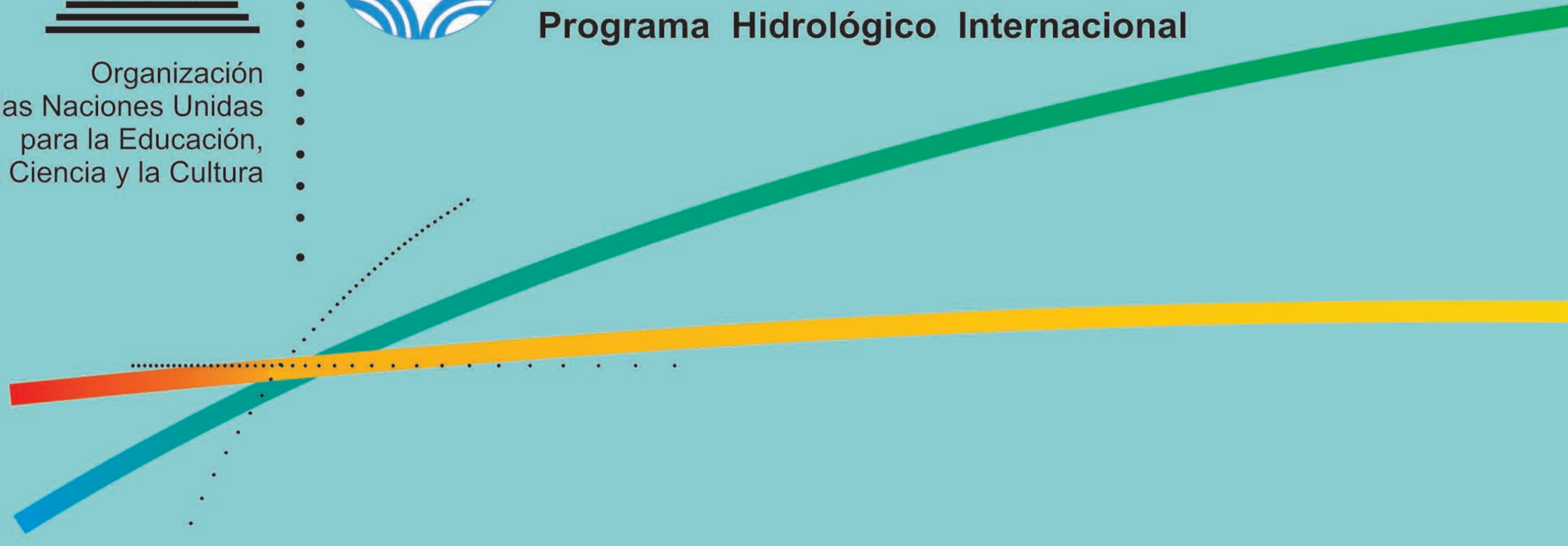




Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa Hidrológico Internacional



V Conferencia Mundial FRIEND, La Habana, Cuba, 2006  
V FRIEND World Conference, Havana, Cuba, 2006

Impactos Hidrológicos de la Variabilidad y el Cambio Climático  
Hydrological Impacts of Climate Variability and Change

Selección de trabajos de América Latina y el Caribe  
Selected presentations on Latin America and the Caribbean

**phi** - LAC  
Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO  
para América Latina y el Caribe

PHI - VI / Documento Técnico  
IHP - VI / Technical Document

N° 11





**V Conferencia Mundial FRIEND, La Habana, Cuba, 2006**

**Impactos Hidrológicos de la Variabilidad y el Cambio Climático**

**Selección de trabajos de América Latina y el Caribe**

**V FRIEND World Conference, Havana, Cuba, 2006**

**Hydrological Impacts of Climate Variability and Change**

**Selected presentations on Latin America and the Caribbean**

**Documento Técnico del PHI – LAC Nº 11**

**Technical Document IHP – LAC Nº 11**

*Editor científico / Scientific Editor*

*Eduardo O. Planos Gutiérrez*

*Coordinador Regional / Regional Coordinator*

*FRIEND AMIGO LAC*

Published in 2007 by the International Hydrological Programme (IHP), Regional Office for Science for Latin America and the Caribbean (Montevideo, Uruguay), Regional Office for Culture for Latin America and the Caribbean (Havana, Cuba) of the United Nations Education, Scientific and Cultural Organizations (UNESCO).

Technical Document IHP - LAC, N° 11

ISBN 92-9089-109-2

© UNESCO 2007

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

This publication may be reproduced in whole or in part form for education or nonprofit use, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. As a courtesy the authors should be informed of any use made of their work

This publication should be cited as:

UNESCO, 2007 - V FRIEND World Conference, Havana, Cuba, 2006 - Hydrological Impacts of Climate Variability and Change - Selected Presentations on Latin America and the Caribbean. Technical Document IHP - LAC, N° 11.

Free copies of this publication should be requested to:

International Hydrological Programme for Latin America and the Caribbean (IHP-LAC)  
Office for Science for Latin America and the Caribbean of United Nations Education, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)

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

Tel.: + 598 2 413 20 75

Fax: + 598 2 413 20 94

E-mail: [phi@unesco.org.uy](mailto:phi@unesco.org.uy)

<http://www.unesco.org.uy/phi>

Publicado en el 2007 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI), la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe (Montevideo, Uruguay), la Oficina Regional de Cultura para América Latina y el Caribe (La Habana, Cuba) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Documento Técnico PHI - LAC, N° 11

ISBN 92-9089-109-2

© UNESCO 2007

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos, no implican de parte de la UNESCO juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni sobre la delimitación de sus fronteras o límites.

Se autoriza la reproducción total o parcial para uso educativo o no comercial, a condición de que la fuente se mencione en forma apropiada y se envíe copia a la dirección abajo citada. Como cortesía, se deberá informar a los autores, de cualquier uso hecho de su trabajo.

Este documento debe citarse como:

UNESCO, 2007 - V Conferencia Mundial FRIEND, La Habana, Cuba, 2006 - Impactos Hidrológicos de la Variabilidad y el Cambio Climático - Selección de trabajos de América Latina y el Caribe. Documento Técnico PHI - LAC, N° 11

Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:

Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe  
Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

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

Tel.: + 598 2 413 20 75

Fax: + 598 2 413 20 94

E-mail: [phi@unesco.org.uy](mailto:phi@unesco.org.uy)

<http://www.unesco.org.uy/phi>

## INDICE / TABLE OF CONTENTS

PRÓLOGO. Enfoque regional del análisis hidrológico / <i>FOREWORD. Hydrological analysis regional approach</i> .....	5
CAPITULO 1 - Datos y Sistemas de Información Geográfica / <i>CHAPTER 1 - Data and Geographic Information Systems</i> .....	9
Las bases de datos y su importancia en las diferentes etapas de la modelación de acuíferos / <i>Data base and its importance in the different     stages of aquifer modeling</i> .....	11
Propuesta para una nueva delimitación de cuencas hidrográficas en México / <i>Proposal for a new delimitation of hydrographic basins in Mexico</i> .....	19
Diseño de redes de monitoreo para el control del ciclo hidrológico y la calidad de las aguas / <i>Design of monitoring systems for the control     of the hydrological cycle and water quality</i> .....	26
Le Programme CARAÏBE-HYCOS: un exemple de coopération régionale dans les domaines de l'environnement et du développement durable / <i>El Programa CARIBE-HYCOS: un ejemplo de cooperación regional dentro de los     dominios del medio ambiente y el desarrollo sustentable /     The CARIBE-HYCOS Programme: an example of regional cooperation related     to the environment and sustainable development</i> .....	32
CAPITULO 2 - Extremos hidrológicos / <i>CHAPTER 2 - Hydrological extremes</i> .....	39
Comparative hydrological drought-flood risk modeling at northern Mexico and West African Sahel region / <i>Modelo comparativo de riesgo de sequía hidrológica e inundación en el     norte de México y la región oeste Africano Sahariana</i> / .....	41
CAPITULO 3 - Tendencia, teleconexiones y variabilidad climática / <i>CHAPTER 3 - Tendencias, teleconnections and climate variability</i> .....	53
The influence of teleconnections on rainfall variability in Southwestern Puerto Rico / <i>La influencia de teleconexiones en la disponibilidad de lluvias     en el sudoeste de Puerto Rico</i> / .....	55
Contenido integral de vapor de agua en la zona tropical entre 17° y 25° latitud norte y 66° y 97° longitud oeste / <i>Integral water vapour contents in the tropical zone     between 17° and 25° North and 66° and 97° West</i> .....	62
Días con tormentas en la Provincia de Ciego de Ávila. Elementos sinópticos para su predicción / <i>Storm days in the Ciego de Ávila Province.     Synoptic elements for its forecast</i> .....	72
Spatial and temporal variability of the hydroclimatic features of the Ecuadorian Amazon basin / <i>Variabilidad espacial y temporal de las características     hidroclimáticas de la cuenca del Amazonas ecuatoriano</i> .....	81

CAPITULO 4 - Agua subterránea, calidad del agua y ecohidrología /	
<i>CHAPTER 4 - Groundwater, water quality and ecohydrology</i> .....	99
Contaminación de las aguas en la cuenca urbanizada del río “Quibú”, en ciudad de La Habana / <i>Contamination of water in the urbanized basin of the “Quibú” river, in Havana City</i> .....	101
Patrones, procesos y origen de la composición química del sistema de flujos de la Sierra del Rosario / <i>Patterns, processes and origin of the chemical composition of the flux system from Sierra del Rosario</i> .....	110
Procesos geoquímicos y calidad de las aguas en acuíferos cársicos costeros contiguos a un humedal / <i>Geochemical processes and water quality in carsic coastal aquifers adjacent to a wetland</i> .....	120

## PRÓLOGO

### ENFOQUE REGIONAL DEL ANÁLISIS HIDROLÓGICO

La ciencia del agua es un mundo inacabable para la investigación científica y la creación; en el agua convergen todas las necesidades, los sentimientos y las tradiciones humanas; el agua es origen y sostén de la vida; el agua es fuente de alimentación; el agua es también base de la cultura, las tradiciones y la religiosidad; y, lamentablemente, causa de conflictos diversos entre personas y países. El agua es un recurso renovable pero finito, agredido en muchos lugares por un uso irracional, en proporción tal, que la disposición desmedida de contaminantes en los cuerpos de agua o su explotación por encima de su capacidad natural de renovación, podría también poner en riesgo su condición de recurso renovable. Sobre el agua igualmente existe la amenaza de un cambio climático que afectará su distribución espacial y temporal de manera no conveniente en todos los lugares.

La situación ambiental en América Latina y el Caribe es frágil, y particularmente sobre el agua existen amenazas que justifican la necesidad de acciones urgentes. La deforestación intensiva de las selvas tropicales y los bosques de regiones templadas y frías; la modificación o destrucción de los ecosistemas costeros, el elevado grado de erosión debido a prácticas agrícolas inadecuadas y usos del suelo incorrectos; la utilización indiscriminada de productos químicos o sintéticos en la actividad agrícola y la industria urbana; integrado a los problemas ambientales globales, entre ellos, el cambio climático y la degradación de la capa de ozono; se dejan sentir también en diferentes grados en los distintos contextos del continente. Una evaluación del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, efectuada en Bridgetown, Barbados, en el año 2000, reconoció la continuación del deterioro ambiental en la región y al analizar el problema del agua, indicó entre los principales problemas los siguientes:

Aumento del deterioro en la calidad del agua.

Reducción de la disponibilidad de agua.

## FOREWORD

### HYDROLOGICAL ANALYSIS REGIONAL APPROACH

The science of water is an endless world for scientific research and creativity, in the water all the needs converge, the feelings and human traditions, water is the origin of life and its sustain, water is food supply, and it is also a base of the culture, traditions and religions; and, unfortunately, the cause of diverse conflicts among people and countries. Water is a renewable, but finite resource, endangered in many places by its non-rational use, in such a proportion, that the unmeasured disposal of pollutants in the water bodies or its exploitation over its natural capacity of renewal, might also put at risk its condition of renewable resource. Water is under the threat of climatic change that will affect its spatial and temporal distribution in a negative way in every place.

The environmental situation of Latin America and the Caribbean is fragile, and particularly in relation to water many threats exist that justify the need of urgent actions. The intensive deforestation in the tropical forest and woods from temperate and cold regions; the modification or destruction of coastal ecosystems, the high degree of erosion due to inadequate agriculture practices and incorrect use of the soil; the indiscriminated use of chemical and synthetic products in agriculture and urban industries; integrated to global environmental problems, among them, climate change and the ozone layer depletion, are being felt in different degrees in various parts of the continent. An evaluation of the Forum of Ministries of Environment in Latin America and the Caribbean, carried out in Bridgetown, Barbados, in 2000, recognized the continuation of the environmental deterioration in the region and in analyzing the problem of water, the following were indicated among the main problems:

Increase of the deterioration in the quality of water.

Reduction in the water availability.

Persistencia de prácticas de manejo de agua no sostenibles.

Insuficiencias en el manejo integrado de recursos hídricos compartidos.

Debilidades en la capacidad institucional para enfrentar las necesidades regionales y nacionales para lograr el manejo integrado de los recursos hídricos.

Sin embargo, la situación existente es reversible. La visión del recurso agua como parte de un análisis ecosistémico medioambiental, integrador de todos los elementos naturales, económicos, sociales y políticos que determinan el estado y la evolución de la naturaleza, permitirá hallar soluciones objetivas que armonicen la necesidad de la utilización del agua como recurso indispensable para el desarrollo sustentable, preservando su condición de recurso medioambiental sostén de la vida.

El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO hace una contribución valiosa al noble propósito de preservar el agua y potenciarla como bien de la biodiversidad, propiciando con su agenda de trabajo y sus proyectos de investigación, un marco ideal para ese propósito. El proyecto FRIEND (Regímenes de corriente y bases de datos internacionales experimentales) es una de estas acciones. Durante 20 años de trabajo, este proyecto global, ha tenido como objetivo esencial, mejorar la comprensión de la variabilidad espacial y temporal de régimen hidrológico a escala regional y desarrollar herramientas de análisis que permitan detectar cambios significativos en la calidad, cantidad y distribución del agua; elementos esenciales para cualquier acción que entorno a este recurso se emprenda.

Como parte de las actividades del FRIEND, se han realizado cinco grandes reuniones internacionales, la última realizada en La Habana, en el año 2006, y llamada "V Conferencia Mundial", son una muestra del grado de avance de este proyecto. Estas reuniones son un marco propicio para evaluar el avance del conocimiento científico en los campos afines a este proyecto y trazar las líneas de trabajo futuro. La "V Conferencia Mundial FRIEND" sesionó bajo el objetivo central denominado "Impactos hidrológicos de la variabilidad y el cambio climático" y reunió a más de 200 expertos de todas partes del mundo, 42 de ellos procedentes de América Latina y el Caribe. Los resultados de la V Conferencia Mundial FRIEND demostraron

Persistence of non-sustainable water management practices.

Insufficiencies in the integrated management of shared hydrological resources.

Weaknesses in the institutional capacities to confront regional and national needs for reaching the integrated management of hydrological resources.

However, the present situation is reversible. The vision of the resource water as part of an ecosystemic environmental analysis, as an integrating factor of natural economic, social and political elements, that determine the state and evolution of the nature, will allow to find objective solutions that harmonize the need to use water as an essential resource for sustainable development, preserving its condition as environmental resource for life support.

The International Hydrological Programme of UNESCO makes a valuable contribution to the noble purpose of preserving water and potentiate it as a biodiversity good, favouring with its workplan and its research projects, an ideal framework for this purpose. The FRIEND Project (Flow Regimes and International Experimental Data Base) is one of those actions. During 20 years of work, this global project, has had as essential objective, to improve the understanding of the spatial and temporal variability of the hydrological regime at a regional scale and to develop analysis tools that allow detecting significant changes in the quality, quantity and water distribution, essential elements for every action that might be undertaken in relation of this resource.

As part of the FRIEND activities, five important international meetings have taken place, the last one was held in Havana, in the year 2006, and was referred to as the "V World Conference", these constitute a showcase of the degree of advance of this project. These meetings are a favourable framework for evaluating the advance of the scientific knowledge in the fields related to this project and draw up future working lines. The V World FRIEND Conference organized its sessions under one central objective; namely "Hydrological impacts of climate variability and change" and brought together more than 200 experts from around the world, 42 of which were from Latin America and the Caribbean. The results of the V World FRIEND Conference

la fortaleza alcanzada por este proyecto en los temas siguientes:

1. Las investigaciones que se realizan sobre caudales bajos, con el objetivo de analizar, cuantificar, predecir y evaluar las incertidumbres actuales y futuras del ciclo del agua; y evaluar el impacto de la frecuencia de la sequía en el agua y los sectores de ella dependiente.
2. Variaciones de larga – escala, incluyendo en estas el pronóstico del régimen estacional de las corrientes fluviales, el entendimiento del impacto del cambio climático y de los cambios en el uso de la tierra.
3. Nuevos enfoques del análisis de la distribución espacial de los procesos hidrológicos por medio de la interpolación y la regionalización.
4. La reducción de la incertidumbre del modelado de los fenómenos hidrológicos extremos, con especial atención a las precipitaciones máximas y las inundaciones; incluyendo en esto la estimación de hidrogramas de diseño de períodos de retornos elevados.
5. La profundización en el conocimiento de las relaciones entre la generación del escurrimiento, la geología, la geomorfología, el clima, el suelo y el uso y manejo de la tierra.

La presente publicación es una contribución adicional a los resultados de esta Conferencia y del proyecto FRIEND. Este documento presenta una selección de los trabajos expuestos por expertos de la región y sobre la región en la “V Conferencia Mundial”.

*Eduardo O. Planos Gutiérrez  
Coordinador Regional FRIEND  
América Latina y el Caribe*

demonstrated the strenght reached by this project in the following topics:

1. Research on low flows, with the objective of analyzing, quantifying, predicting and evaluating the present and future uncertainties of the water cycle, and evaluating the impact of the drought frequency in the water and related sectors depending on it.
2. Variations of large scale: including the forecast of the seasonal regime of river flows and the understanding of the impact of climatic change and changes in land use.
3. New approaches in the analisis of the spatial distribution of hydrological proceses by means of interpolation and regionalization.
4. Reduction of the uncertainty in the modeling of hydrological extreme phenomenna, with special attention to maxima in precipitation and floods, including the estimation of hydrological diagrams on high return periods.
5. In depht study of relations between drainage generation, geology, geomorphology, weather, soil, and use and land management.

The present publication is an additional contribution to the results of this Conference and the FRIEND Project. This document offers a selection of works by experts of the region and on the region presented in the “V World Conference”.

*Eduardo O. Planos Gutiérrez  
FRIEND Regional Coordinator  
Latin America and the Caribbean*



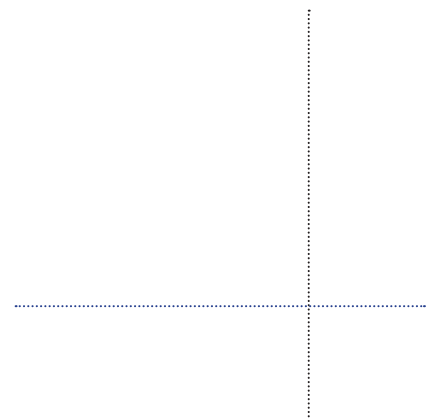


## **CAPITULO 1**

### **DATOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

## **CHAPTER 1**

### **DATA AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS**





# LAS BASES DE DATOS Y SU IMPORTANCIA EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE LA MODELACIÓN DE ACUÍFEROS

## DATA BASE AND ITS IMPORTANCE IN THE DIFFERENT STAGES OF AQUIFER MODELING

ARMANDO O. HERNÁNDEZ VALDÉS  
Profesor Auxiliar  
Centro de Investigaciones Hidráulicas  
CUJAE  
Cuba  
E-mail: ahernandez@cih.cujae.edu.cu

### RESUMEN

*La tecnología de la modelación de acuíferos es una herramienta imprescindible en la actualidad para la toma de decisiones tanto para el manejo sustentable de los recursos hidráulicos subterráneos como en la evaluación del impacto de la incidencia de diferentes obras civiles sobre los mismos. Para la aplicación de esta tecnología se requiere el manejo de grandes bases de datos en las diferentes etapas del proceso de simulación, aspectos que este trabajo analiza en sus experiencias de aplicación en Cuba y se muestran en particular los resultados de estas experiencias en la modelación matemática de un sector del acuífero correspondiente a la zona costera sur de la provincia de La Habana. Se hace un análisis de los últimos avances tecnológicos logrados nacional e internacionalmente con la integración de la modelación de acuíferos con tecnologías de adquisición de datos y su acoplamiento con los Sistemas de Información Geográfica.*

**Palabras clave:** modelación, acuíferos, evaluación de impacto

### INTRODUCCIÓN

Desde las dos últimas décadas del siglo pasado, el empleo de las técnicas de la modelación matemática de acuíferos se ha convertido en una herramienta imprescindible en los estudios hidrogeológicos dirigida a: evaluar la hidrodinámica del sistema, estudiar el transporte de contaminantes en el acuífero, caracterizar la interacción con las aguas superficiales y el uso conjunto, definir estrategias de administración vinculando los resultados del modelo de simulación con las técnicas de optimización. A su vez, esta herramienta integra las bases de datos y resultados que aportan otros métodos de estudio como son: la geofísica, los métodos geológicos, la geoestadística, la teledetección, la hidrogeoquímica, la hidráulica de pozos, las técnicas isotópicas, los métodos hidrológicos.

Según señala Hefny K. 1998, el continuo monitoreo de las aguas subterráneas y las bases de datos computarizadas son una herramienta poderosa para la predicción, el desarrollo de políticas de manejo y la confiabilidad de los resultados de las herramientas de modelación que se utilicen.

A medida que se necesiten modelos más sofisticados, en igual medida se incrementan los requerimientos de calidad y cantidad en las bases de datos. Los mapas hidrogeológicos son una de las formas de representación de las características del sistema acuífero y la utilización de sensores remotos combinados con la utilización de los SIG han permitido mejorar la precisión en las salidas gráficas y reducir el costo de su elaboración.

En Alley *et al.* 1999, se resalta la importancia de las bases de datos de las aguas subterráneas y el uso de la modelación, para desarrollar estrategias ante los desafíos que plantean para asegurar un uso sustentable de los recursos hídricos subterráneos.

Las bases de datos que son necesarias manipular estarán en correspondencia con los elementos que definen al acuífero como un sistema.

## EL ACUÍFERO COMO SISTEMA

Si se analizan las características que definen al acuífero como el ente físico que es objeto de estudio y el cual se quiere representar mediante un modelo, se le pueden señalar las siguientes particularidades:

- Es una formación geológica con una geometría bien definida pero en su mayor parte desconocida.
- En esta formación se almacena y circula el agua, por lo que en ella se desarrolla parte del ciclo hidrológico de la región a la que pertenece.
- Las propiedades hidráulicas de este medio lo caracterizan como heterogéneo y por lo general anisótropo.
- El agua se mueve en el acuífero siguiendo leyes físicas conocidas pero con parámetros desconocidos y ambos definen su comportamiento hidrodinámico.
- Las entradas y salidas de agua del acuífero van a depender de las características de sus fronteras, del estado del acuífero, de factores climáticos, de sus propiedades hidrogeológicas y de las acciones que el hombre realiza sobre él.
- Las condiciones de estado que definen en un momento dado la calidad del agua subterránea y sus niveles, van a depender de los factores anteriores.

## LOS MODELOS DE ACUÍFEROS Y SU IMPORTANCIA

La modelación obliga a una revisión, reordenamiento y actualización de la base de datos, ya que se requiere acopiar y procesar un gran volumen de información que por lo general existe en las empresas usuarias y administradoras del recurso hídrico subterráneo. Esta base informativa está dispersa y se ha manipulado de forma aislada y no con la visión de sistema a que obliga el modelo de un acuífero, por lo que no se ha hecho de ella un uso óptimo. De lo anterior se deriva que un objetivo que se logra con el modelo es el de completar, procesar y almacenar la base de datos del sistema acuífero, la cual puede ser utilizada en trabajos posteriores. Esto ha sido comprobado en los trabajos realizados con diferentes empresas del país.

En la modelación matemática de acuíferos se pasa por diferentes etapas bien conocidas que van desde la *caracterización*, donde se crea el modelo conceptual del sistema, la *calibración*, que permite identificar los parámetros que representan al mismo, (sobre las características y metodología de esta etapa se puede ampliar en el tema III de Hernández *et al.* 2001), la *verificación*, donde se determina si dichos parámetros son confiables. Una vez concluidas las etapas de calibración y verificación, donde ya se han confirmado las hipótesis del modelo conceptual concebido y se han podido observar las respuestas del modelo a las modificaciones de las propiedades hidrogeológicas por elementos, se pueden llegar a establecer las zonas de circulación preferencial y con mayores posibilidades de captación o asimilación de recarga artificial, definir las necesidades de mejorar la base informativa y orientar la realización de tareas de investigación específicas que permitan economizar el uso de los recursos humanos y materiales. La última etapa de la modelación es conocida como de *pronóstico* o explotación. Según se señala Taylor C. J. y Alley W. M. (2001), *mejorar el conocimiento del sistema de flujo del agua subterránea y las limitaciones en las bases de datos identificadas en la etapa de calibración del modelo de flujo, han proporcionado la visión de la importancia crítica que para el futuro tienen la colección de datos de niveles de agua, pero desafortunadamente la utilización del modelo para controlar el comportamiento futuro de dichos niveles raramente se ha hecho.* A lo anterior es

necesario añadir que no sólo se requiere del control de los niveles de las aguas subterráneas, sino también de todas las acciones que sobre el sistema acuífero se producen.

El modelo de un acuífero es una representación simplificada del sistema real y nunca se puede identificar con esa realidad, por lo que se requiere de los criterios de los profesionales administradores del agua para que a partir de los resultados de la simulación planifiquen las acciones apropiadas.

Según Alley *et al.* 1999, se parte del hecho de que si el modelo del acuífero es capaz de representar adecuadamente las leyes que rigen el comportamiento del flujo y el transporte en el mismo, entonces será capaz de simular las relaciones causa efecto sobre este para un conjunto de condiciones definidas en el pronóstico. Sin embargo, como señalan Konikow y Bredehoeft (1992) usualmente es necesario pronosticar condiciones con grandes incertidumbres por la escasa y poco confiable base de datos utilizada en la calibración, por errores en el modelo conceptual no concebido para situaciones futuras y por situaciones nuevas que no se presentaron como condiciones observadas anteriormente. En el caso del modelo de Cuenca Sur de La Habana (Llanusa *et al.* 2004), se calibró antes de la construcción del Dique Sur y las condiciones de contorno en la zona costera cambiaron posteriormente, de igual forma, aunque se tuvo en cuenta el efecto sobre el acuífero de un canal con agua trasvasada desde otra cuenca y la recarga al acuífero que representaba las pérdidas de agua desde ese canal, no se tenían mediciones hidrométricas que permitieran cuantificar dichas pérdidas y el flujo de retorno del riego. Estas condiciones cambiantes tienen que ser objeto de actualización en el modelo del acuífero y a medida que aparecen nuevos datos es necesario revisar la calibración, por lo que esta etapa tiene que ser continuamente controlada si se quiere realizar un pronóstico confiable según determinado horizonte de planeamiento (Konikow y Reilly, 1999). Aunque en los modelos existen diversos grados de incertidumbre, no dejan de ser en la actualidad la mejor herramienta para la toma de decisiones sobre las acciones a realizar en el sistema acuífero, ya que se pueden realizar diversas pruebas variando los parámetros dudosos, cuantificando las consecuencias de los errores de incertidumbre y seleccionando las mejores alternativas. El efecto de una política de explotación del acuífero puede necesitar varios años para que se manifieste, por lo que la colección continua de datos y su análisis comparativo con las situaciones simuladas previamente, puede resultar de gran utilidad para las políticas de administración del sistema.

En los resultados de la modelación se reflejan no sólo las insuficiencias de las bases de datos por los sistemas de adquisición, almacenamiento y procesamiento, sino también como se señala en Reilly T. E. y Harbaugh A. W.(2004), errores en sistemas de unidades, inconsistencia de los datos, asignaciones espaciales incorrectas, errores de entrada o equivocaciones, por tal motivo resulta necesario perfeccionar los sistemas de adquisición, procesamiento y entrada, con la utilización de nuevas tecnologías informáticas y electrónicas.

En todas las etapas de la modelación es necesario manipular grandes volúmenes de información por lo que se han ido perfeccionando los sistemas de adquisición y procesamiento de estas bases de datos, empleando sistemas automatizados de medición, control y transmisión, software de procesamiento y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para las entradas y salidas de mapas temáticos.

## **LAS BASES DE DATOS, SU ORGANIZACIÓN Y PROCESAMIENTO**

Según Alley *et al.* 1999, la disponibilidad de datos de alta calidad es un requisito básico para realizar cualquier análisis cuyo objetivo sea proponer y evaluar estrategias de administración de las aguas subterráneas. Muchos datos pueden ser visualizados en mapas, siendo los SIG una herramienta útil para la organización, almacenamiento, ordenamiento y representación visual de la información necesaria.

Algunas bases de datos son más fáciles de obtener que otras, así por ejemplo:

- La precipitación, está generalmente disponible y es relativamente fácil de obtener en el momento de un análisis hidrológico.
- Los datos geológicos e hidrogeológicos pueden requerir años para completarlos como son: profundidad y espesores de las unidades hidrogeológicas obtenidas de la litología,

la geofísica de pozos, la cartografía geológica, la hidrogeoquímica. La explotación y la hidrometría de las corrientes superficiales posee un amplio rango de variabilidad en su conocimiento, según el tipo de uso a que se dedica el recurso hídrico, la importancia del sistema acuífero, la disponibilidad de recursos técnicos y económicos para su control.

- Los otros datos de la historia de niveles de agua en las diferentes partes de los sistemas acuíferos, requieren la previsión para estar disponibles en la dimensión tiempo. Las mediciones de los niveles y la calidad de las aguas subterráneas durante períodos prolongados, permiten evaluar la respuesta del acuífero ante acciones controlables y no controlables, sobre todo ante eventos extremos y su relación con las aguas superficiales. Así, un punto de arranque clave por asegurar un futuro sustentable para cualquier sistema acuífero, es disponer de una base de datos hidrogeológica acorde a su desarrollo con el tiempo.

Los datos que normalmente se requieren para desarrollar un adecuado proceso de modelación tienen diferentes características de acuerdo a la calidad de su obtención y disponibilidad, pudiéndose agrupar y clasificar según la siguiente Tabla.

Tipo de información requerida	Disponibilidad	Importancia	Calidad	Observaciones sobre situación en países en desarrollo
<b>1. Características físicas del sistema acuífero</b>				
Mapas topográficos mostrando la red hidrográfica y cuerpos de agua	Generalmente a la escala de trabajo	Alta	Aceptable	No siempre se tiene en forma digital
Mapas geomorfológicos	No siempre	Grande	Adecuada	No siempre se tienen
Mapas con tipos y uso de suelos	No siempre	Grande	Adecuada	Difícil de obtener
Mapas geológicos e hidrogeológicos	No acorde con la escala	Grande	Poco precisa	Para estudios generales son aceptables
Mapas de fondo y techo de unidades confinantes	Casi nunca	En ocasiones alta	Dudosa	Información escasa sobre estos estratos
Mapas por unidades acuíferas de: transmisividades, gastos específicos, conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento	Localmente	Alta	Dudosa	Generalmente no es posible hacer mapas de toda el área por falta de información

## **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BASES DE DATOS EN EL PROCESO DE MODELACIÓN DEL ACUÍFERO COSTERO SUR DE LA HABANA.**

Se planteó la necesidad de confeccionar este modelo para evaluar el incremento de recursos hídricos en el acuífero debido a la retención de drenaje superficial hacia el mar sobre la base de la construcción de un dique, Llanusa *et al.* (2004).

La zona de estudio se encuentra en el sur de la provincia de La Habana abarcando un área de 830 km<sup>2</sup> y el Dique Sur de La Habana se ubica entre la playa Majana al oeste y el Surgidero de Batabanó

al este para un total de 100 Km de terraplenes. La discretización realizada tuvo en consideración la ubicación del campo de pozos del Acueducto Cuenca Sur y el contorno sur coincidió con el dique.

El objetivo del dique es interrumpir parcialmente el flujo libre al mar de las aguas e incrementar así el volumen de agua almacenado en el acuífero, la carga hidráulica en la zona de almacenamiento por el efecto de remanso producido y como consecuencia mejorar la calidad del agua del acuífero.

Para lograr la simulación del efecto del dique se decidió utilizar un mismo período de tiempo e imponerle primero al modelo las condiciones naturales y después las condiciones con la construcción del dique y finalmente comparar los resultados.

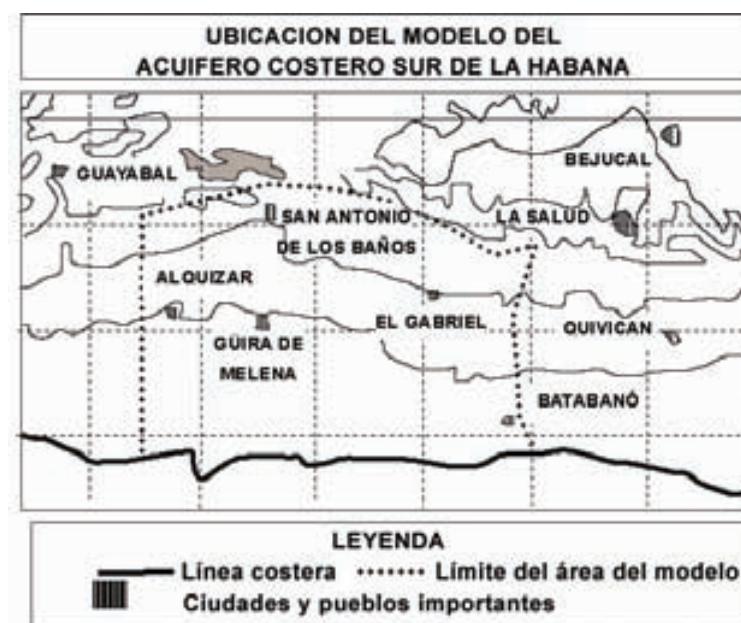
Las condiciones hidrogeológicas de la región son complejas debido a la gran heterogeneidad y anisotropía de las rocas con diferentes grados de carsificación, cuenca abierta con descarga al mar, compleja composición química del acuífero y una extracción del agua intensa e irregular.

El período escogido para la calibración del modelo fue de mayo de 1982 a octubre de 1985, etapa que corresponde a la época anterior a la construcción del dique para posibilitar el análisis del efecto del dique posteriormente. Este período quedó dividido en 14 intervalos de tiempo al utilizarse el trimestre.

### **Condiciones de contorno**

La zona de estudio limita por el norte con el parteaguas del sur de la Laguna de Ariguanabo y parte del parteaguas central, zona donde el acuífero se encuentra en contacto con formaciones poco permeables considerándose un contorno impermeable. Los límites oeste y este se tomaron como contornos impermeables también ya que estas zonas se pueden delimitar por una línea de corriente. Y el límite sur como una zona de descarga subterránea al mar, de carga piezométrica conocida en todos sus nodos, considerándose una carga constante e igual a 0,20 m por la falta de información.

Se observa que en el período de calibración elegido la lluvia caída está por encima del comportamiento del año medio en los primeros seis intervalos (año y medio), por lo que se decidió reducir este período a los ocho trimestres restantes, que correspondía a dos años secos, para lograr una mejor calibración de las propiedades hidrológicas al no introducir errores grandes en el tratamiento dado a la infiltración eficaz.



*Ubicación del modelo del acuífero costero sur de La Habana*



La recarga del acuífero producto de la lluvia es un factor altamente dudoso ya que en la mayoría de los casos los datos de la lluvia de que se dispone son generalmente de pluviómetros y no existen estaciones hidroclimatológicas que permitan aplicar métodos de balance hídrico de suelos diarios para calcular espacialmente y temporalmente el comportamiento de la infiltración diaria acorde con los parámetros climáticos, tipos de suelo, cultivos, topografía.

No pudo efectuarse con rigor una calibración del modelo hidrológico determinístico MIDE, al no disponer esta cuenca de datos de escurrimiento superficial. Por esta razón, se hizo un análisis de la experiencia acumulada en la aplicación del modelo, eligiéndose los parámetros de la cuenca Jaruco en la Habana con características similares al tramo de estudio de la Cuenca Sur.

En la mayoría de los casos la infiltración profunda se estima a partir de los datos de las lluvias medias mensuales como valores porcentuales de éstas, lo que resulta un valor altamente dudoso.

Para completar el tratamiento de la recarga del acuífero se realizó un análisis de las pérdidas de agua en los canales del Complejo Mampostón-Pedroso-Güira, haciéndose una asignación puntual de esas pérdidas estimadas en los nodos cercanos a los puntos de entrega del canal (esos valores se estimaron ya que no se tenían datos de mediciones hidrométricas a lo largo del canal).

### **Explotación en el acuífero**

Fueron procesadas la ubicación y extracción mensual de 819 pozos, observándose períodos secos de gran intensidad con volúmenes superiores a 100 hm<sup>3</sup>/sem.

<b>Tipo de información requerida</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Importancia</b>	<b>Calidad</b>	<b>Observaciones sobre situación en países en desarrollo</b>
<b>2. Cuenca hidrográfica y acciones sobre el sistema acuífero</b>				
Ubicación de estaciones y series de datos de precipitación	Generalmente	Alta	Aceptable	Por lo general series cortas e incompletas
Otros datos climatológicos	No siempre	Alta	Escasa	Se utiliza información de cuencas análogas
Datos de estaciones hidrométricas y de aportes subterráneos	No siempre	Alta	Escasa	Se hacen mediciones puntuales y algunas aproximaciones
Registros de manantiales y gastos	No siempre	Alta	Escasa	Datos puntuales
Flujo de retorno de riego y pérdidas por conducción en canales	No disponible	Alta	Ninguna	Estimaciones
Recarga artificial y trasvases	Posible obtener	Alta	Aceptable	No siempre se controla
Ubicación y características de pozos de bombeo y trincheras de captación (medición y localización)	Posible pero incierta	Alta	Dudosa	Solo se controla mejor para uso de acueductos
Datos de las características de la red de observación de niveles y mapas de hidroisohipsas	Disponible a escalas pequeñas	Alta	Dudosa	Depende de la red de observaciones espacial y temporal

Este dato se considera debe ser demás confiable, pero en realidad es bastante incierto, ya que no se realizan mediciones sistemáticas de la explotación, salvo en los pozos del Acueducto de Cuenca Sur. Los productores individuales reportan menos de lo utilizado, para que no se les cobre este servicio, las empresas estatales reportan valores dudosos por capacidad instalada, consumo de combustible, horas de riego (los regadores dicen más que lo real), tipo de cultivo y período. Además de lo anterior existen pozos no registrados.

Tipo de información requerida	Disponibilidad	Importancia	Calidad	Observaciones sobre situación en países en desarrollo
<b>3. Aspectos de calidad del agua</b>				
Mapas hidrogeoquímicos	No siempre	Alta	Aceptable	La red de observación de calidad es pobre y las series de datos incompletos
Ubicación de posibles focos, tipos de contaminantes y su control	Se conocen pero no se controlan	Alta	Escasa	Se requiere aumentar las medidas de control
Mapas de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero	No siempre	Alta	Escasa	La información de partida es poca y de baja confiabilidad
Mapas periódicos de la calidad del agua subterránea	No existen	Alta	no	Ni en acuíferos costeros se dispone de estos mapas
Control de la calidad del agua en los pozos de bombeo	Fundamentalmente de acueductos	Alta	Insuficiente	Los muestreos no son sistemáticos
Control de la calidad del agua en aguas superficiales	No siempre	Alta	Insuficiente	No todos los cuerpos de agua en contacto con los acuíferos se muestrean.
Mapas de espesores de la zona no saturada	No disponible	Alta	Insuficiente	No se tienen datos

### **Valoración de los efectos del dique**

La estimación del incremento de recursos debido a la construcción del dique conllevó a las siguientes premisas para aplicar el modelo AQUIMPE, (Hernández *et al.* 2001):

- simulación del estado natural del acuífero con la infiltración según MHIDE y una carga de 20 cm en el contorno abierto al mar,
- simulación del acuífero con el efecto del dique utilizando el agua en exceso del balance hídrico de suelo según el programa EVABAL donde se aplica el Método de Penman modificado y la carga real medida en los pozos de observación cercanos al dique,
- considerar el estado del acuífero inicial deseado de 952 hm<sup>3</sup> almacenado y por tanto disminuir ese valor afectará al acuífero,
- considerar un año medio para el comportamiento de la lluvia, 1988-89.

En un año hidrológico simulado se extrajeron 190 km<sup>3</sup> quedando el acuífero con un volumen de 895,4 hm<sup>3</sup> de no existir el dique, es decir, 57 hm<sup>3</sup> más de lo recomendado. Sin embargo, con el dique construido se extrae esa misma extracción global resultando un volumen de 986,6 hm<sup>3</sup>, lo que indica 34 hm<sup>3</sup> potencialmente a extraer.

## CONCLUSIONES

1. La importancia de las bases de datos en los estudios de los sistemas acuíferos requiere de una especial atención si pretendemos realizar una explotación sostenible de los recursos hídricos subterráneos.
2. La modelación matemática es la herramienta adecuada para integrar las bases de datos y las informaciones aportadas por otros métodos de estudio de las aguas subterráneas.
3. La confiabilidad del modelo del acuífero depende en gran medida aunque no solamente, de la calidad de las bases de datos de que se disponga.
4. Para utilizar modelos de administración para una gestión adecuada se requiere en primer lugar de disponer de un modelo confiable.
5. Los grandes volúmenes de información que son necesarios procesar y que son fuentes de errores en su manipulación, obligan cada vez más a la utilización de nuevas tecnologías para la adquisición, procesamiento y almacenamiento de las bases de datos.
6. La vinculación de los modelos de acuíferos con otros software de procesamiento, manipulación y representación gráfica como los SIG, obliga a los especialistas a una superación permanente y a las empresas a un mejor uso de estas herramientas para la gestión.

## REFERENCIAS

1. ALLEY, W. M., REILLY, T. E. and FRANKE, O. L. 1999. "Sustainability of Ground-Water Resources". U.S. Geological Survey Circular 1186. Denver, Colorado
2. HEFNY, K. 1998. "Planning and management strategies for major deep aquifers". Research Institute for Groundwater, National Water Center, Cairo, Egypt. Proceedings of the Tashkent Symposium. IHP-V Technical Document in Hydrology. No. XX UNESCO. Paris.
3. HERNÁNDEZ, A. O., MARTÍNEZ, J. B., DILLA, F. y LLANUSA, H. 2001 "Modelación de Acuíferos". Tema III. Texto de la maestría de Ingeniería Hidráulica. ISPJAE.
4. KONIKOW, L. F., and BREDEHOEFT, J. D. 1992, Groundwater models cannot be validated: Advances in Water Resources, v. 15, p. 75–83.
5. KONIKOW, L. F. and REILLY, T. E. 1999, Groundwater modeling, in Delleur, J.W., ed., The handbook of groundwater engineering: Boca Raton, Fla., CRC Press, USA.
6. LLANUSA, H., HERNÁNDEZ, A. O., MARTÍNEZ, J. B., y DILLA, F. 2004. "Modelo del acuífero costero del sur de la Habana: Evaluación del Dique". Memorias del Primer Taller de Expertos en Vulnerabilidad de Acuíferos Costeros en el Caribe Insular. Octubre 12-15 2004. Ciudad de la Habana, Cuba
7. REILLY, T. E. and HARBAUGH, A. W. 2004, "Guidelines for evaluating groundwater flow models". U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038, 30 p.
8. TAYLOR, C. J. and ALLEY, W. M. 2001 "Groundwater-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data" U.S. Geological Survey Circular 1217. Denver. Colorado.

# PROPUESTA PARA UNA NUEVA DELIMITACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN MÉXICO

## PROPOSAL FOR A NEW DELIMITATION OF HYDROGRAPHIC BASINS IN MEXICO

ROGELIO MONDRAGON  
Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)  
Jefe de Departamento de Hidrología  
Aguascalientes, México  
E-mail: rogelio.mondragon@inegi.gob.mx

### RESUMEN

*En México, como en muchos países en el Mundo, hay muchas clasificaciones de cuencas, el criterio para la clasificación depende del objetivo. La división hidrográfica oficial consiste en 37 regiones hidrológicas, 156 cuencas y 1156 subcuencas, pero el criterio que se usó para esta división no está disponible. En 1970 el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) adoptó y mejoró esta clasificación y ahora está disponible en el dataset digital. Actualmente el uso de la cuenca como la unidad de trabajo básica está aumentando, el concepto que los recursos naturales, el sector industrial y sociedad, se desarrollan dentro del límite de la cuenca, implica una visión estratégica para restaurar el equilibrio y la protección de los ecosistemas dañados. El Instituto Nacional de Ecología (INE), la comisión Nacional de Agua (CONAGUA) e INEGI integraron un grupo de trabajo para desarrollar una división de las cuencas nacionales, apoyado en el criterio físico: endorreica o exorreica.*

*El primer resultado de este esfuerzo es un mapa digital dividido en 1448 cuencas: 9 grandes (superiores a 50 000 km<sup>2</sup>), 51 entre 50 000 km<sup>2</sup> y 5 000 km<sup>2</sup> y 1384 pequeñas, con (menos de 5 000 km<sup>2</sup>).*

**Palabras clave:** cuencas, drenaje, endorreica, exorreica

### INTRODUCCIÓN

Actualmente instituciones federales mexicanas como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE) Petróleos Mexicanos (PEMEX) y el mismo Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), entre otras, cuentan con cartografía hidrográfica propia establecida con base en criterios disímiles para cubrir diferentes objetivos. Ante esta situación, se considera de capital importancia establecer criterios comunes para crear una cartografía hidrográfica nacional escala 1:250,000, que satisfaga las diferentes necesidades de usuarios que utilizan el entorno de cuenca hidrográfica como área natural de trabajo.

Como grupo de trabajo consideramos que:

Los límites de las cuencas hidrográficas deben estar regidos por variables hidrográficas y topográficas, dejando de lado criterios como:

- Tamaño
- Uso del suelo
- Grado de contaminación y/o
- Aspectos administrativos



*Regiones Hidrológicas de México (Secretaría de Recursos Hidráulicos)*



*División hidrográfica elaborada por la Secretaría de Programación y Presupuesto; 1983*

Es urgente establecer criterios únicos para delimitar cuencas y subcuencas pensando en generar una cartografía hidrográfica jerárquica a nivel nacional. Los criterios para la delimitación de cuencas deben presentar consistencia y homogeneidad para todo el territorio nacional.

Las cuencas hidrográficas principales son de tipo exorreicas o endorreicas; las primeras se caracterizan por tener un desagüe que permite que las aguas circulen hacia otra cuenca o hacia el mar, mientras que las endorreicas carecen de este desagüe por lo que generalmente drenan hacia un cuerpo de agua interior, como un lago. También existen cuencas arreicas (sin red de drenaje ni salida) y criptorreicas (con drenaje subterráneo sin una red de drenaje superficial bien definida).

En este proyecto, la delimitación de las cuencas hidrográficas se realiza a partir de criterios meramente topográficos (morfográficos) e hidrográficos (red de drenaje superficial). A pesar de existir un acuerdo general sobre estos conceptos, la delimitación de estas unidades territoriales ha seguido caminos distintos tanto en México como en otros países. Sin embargo, en los últimos años, la aceptación de la cuenca hidrográfica como una unidad de planeación y gestión conlleva hacia un cambio de paradigma en el manejo de los recursos naturales, de un enfoque sectorial hacia una visión integral (Cotler, 2004).



*Modelo digital del terreno y delimitación de la cuenca de México*

El objetivo del proyecto es:

Generar una regionalización hidrográfica nacional escala 1:250,000, basada en criterios naturales (hidrográficos y topográficos), en el entendido que cuenca se considera aquella superficie delimitada por un parteaguas, cuyos afluentes confluyen al mar o a un cuerpo de agua interior.

## **PROCESOS METODOLÓGICOS**

1. Generación de la red de drenaje y parteaguas de cuencas mediante medios automatizados.
2. Inspección visual y manual para detallar y rehacer límites de cuencas hidrográficas y red de drenaje
3. Validación y corrección utilizando los siguientes insumos:

Modelo Digital de terreno

Curvas de nivel

Ortofotos digitales

Redes de drenaje

Mapa altimétrico



*Continuo nacional de cuencas hidrográficas; la proyección cartográfica es Cónica Conforme de Lambert (CCL) con los parámetros que utiliza INEGI*



*Sobreposición de red hidrográfica al modelo digital del terreno para verificar parteaguas*

Tabla de atributos asociada al continuo digital

- Área
- Código (ID)
- Longitud de la red hidrográfica.
- Morfometría (altura, densidad de red).
- Tipología de la red.
- Toponimia (bajo criterios y boletines hidrológicos-CNA).

## TOPONIMIA

Para la definición de los nombres de cada una de las cuencas encontradas se utilizaron de manera jerárquica, seis criterios:

1. La cuenca adquiere el nombre del río, corriente o cauce (incluyendo arroyo) que desemboca al cuerpo de agua principal u océano.
2. Se asigna el nombre del cuerpo de agua (natural) más importante en el orden que sigue:
  - Lago
  - Laguna
  - Estero
  - Albufera
3. Se asignará el nombre de los siguientes rasgos geográficos:
  - a) *cuando se encuentren en la costa*
    - Bahía
    - Ensenada
    - Caleta
    - Playa
    - Punta Cabo
    - Barra
    - Marisma
  - b) *cuando se encuentren al interior del continente*
    - Ciénaga
    - Cenote



*Definición de la cuenca del lago de Pátzcuaro en el centro de México*

4. En caso de no cumplir con algún criterio anterior, se asignará el nombre de los siguientes rasgos geográficos:
  - Barranca
  - Cerro o cualquier elevación topográfica más importante de acuerdo a su altitud
  - Sierra
  - Cañada
  - Valle
  - Mesa
5. Se asignará el nombre a partir de las localidades del territorio de la cuenca:
  - Localidad correspondiente a la cabecera municipal más importante (en el caso de que existan varias); cuando no existe ninguna, la cuenca heredará el nombre del poblado o localidad con mayor número de habitantes.

Debido al uso común y generalizado de topónimos para algunas cuencas en el país, se decidió conservar dicha toponimia ya que el manejarlas con nombres nuevos o alternativos puede causar confusión. Por ejemplo: cuenca de México, cuenca Lerma-Chapala y cuenca del río Tijuana.

Clasificación de cuencas en función del tamaño:

*Criterios:*

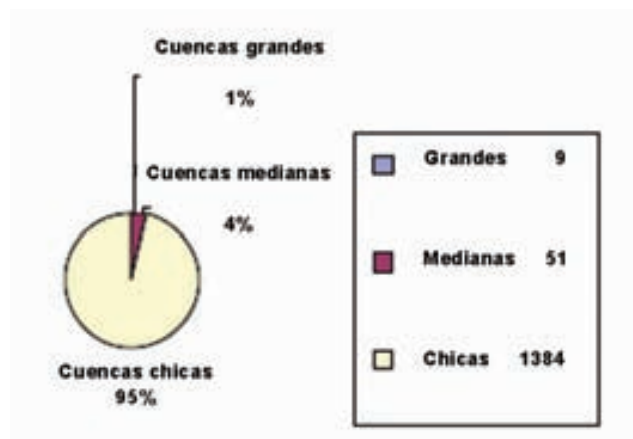
- Cuencas grandes *mayores de 50 000 km<sup>2</sup>*
- Cuencas medianas *5,000 y 50 000 km<sup>2</sup>*
- Cuencas chicas *menores de 5 000 km<sup>2</sup>*

Rasgos	Frecuencia	Porcentaje (%)
Arroyo	568	39
Río	209	14
Punta	104	7
Localidad	74	5
Estero	46	3
Laguna	46	3
Playa	42	3
Cañada	37	3
Bahía	34	9
Otros rasgos	133	29
Sin topónimo	155	911
Total	1448	100

*Estadística de los rasgos utilizados para asignar toponimia*



Aplicando los criterios mencionados el universo de cuencas en México es de 1445 la distribución se presenta en el siguiente gráfico y Tabla.



*Frecuencia de cuencas por tamaño*

Cuencas	Número de cuencas en el país	Cobertura del territorio nacional %
Grandes	9	49
Medianas	51	33
Chicas	1348	18
Total	1445	100

En México nueve cuencas grandes cubren el 49,5% del territorio nacional, 51 cuencas, consideradas medianas abarcan el 33 % de la superficie nacional, mientras que la mayoría de las cuencas de México entran en el grupo de cuencas pequeñas, que en extensión equivale únicamente al 18 % de la superficie nacional.

Esta distribución irregular del número de cuencas relacionado con la frecuencia y extensión se debe a las condiciones morfológicas del país, la mayoría de las cuencas pequeñas se distribuyen principalmente en la costa del Océano Pacífico, especialmente en la Península de Baja California. Esta condición exige la necesidad de contar con cartografía que delimite esa gran cantidad de cuencas pequeñas, donde la interrelación entre el medio natural y la sociedad puede ser en muchos casos estudiada en el marco del contexto de cuenca hidrográfica.

Las cuencas grandes y medianas por su extensión, complejidad y madurez hidrológica deben ser subdivididas en subcuencas con la idea de reconocer los principales tributarios y poder realizar estudios integrales de cuenca considerando la problemática específica de cada tributario como parte de un sistema más complejo en todos sentidos. Las divisorias que delimitan las sub-cuencas se conocen como parteaguas secundarios (INE, 2004).

Prototipo: Una de las preocupaciones, es para productos impresos, definir los rangos de las escalas de salida de las cuencas hidrográficas de acuerdo a la extensión de la misma, considerando que los insumos para la delimitación son base 1:250 000, se han delimitado cuencas mayores de 100.000 kilómetros cuadrados para las cuales la escala apropiada de salida debe ser mayor de 5000 000 y hay áreas hasta de cinco kilómetros cuadrados donde la escala bien podría ser 1:50 000, el siguiente es una carta impresa prototipo en escala 1;250 000 para la península de Baja California.



*Ejemplos de cuenca endorreica (Valle Hundido-Coahuila) y cuenca exorreica (Río Novillero-Chiapas)*



*Prototipo carta impresa escala 1:250 000 con la representación de cuencas hidrográficas*

### **Perspectivas:**

- Presentar talleres a lo largo del país para que los usuarios de información conozcan la nueva delimitación, la hagan suya en el transcurso para afinar detalles.
- Proponer que esta división hidrográfica se analice para que pueda ser adoptada por los países vecinos e integrar una cartografía de cuencas hidrográficas continental, basada en los mismos criterios y con el uso de insumos similares.
- Preparar en formato digital los archivos digitales de la delimitación de cuencas hidrográficas y la red hidrográfica conectada, ambos archivos con su respectiva base de datos y atributos.

### **REFERENCIAS**

1. COTLER, H. 2004 (Compiladora) El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental; Instituto Nacional de Ecología, 264p.

# DISEÑO DE REDES DE MONITOREO PARA EL CONTROL DEL CICLO HIDROLÓGICO Y LA CALIDAD DE LAS AGUAS

## DESIGN OF MONITORING SYSTEMS FOR THE CONTROL OF THE HYDROLOGICAL CYCLE AND WATER QUALITY

OTILIO BEATO MESA  
Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos  
Cuba  
E-mail otilio@hidro.cu

### RESUMEN

*Una red es un sistema organizado para la recolección de información de una clase específica, donde sus partes componentes deben estar relacionadas unas con otras, esto es cada estación, dentro de un área, territorio o cuencas dada, las cuales deben llenar las lagunas que puedan quedar tanto en espacio como en el tiempo. La densidad de las diferentes redes de monitoreo está en función del área del territorio que debe abarcar y de la finalidad del estudio.*

*Una red óptima tiene la finalidad de realizar una ejecución satisfactoria de un programa definido de monitoreo, obtenido en los diferentes puntos de observación que permitan determinar con exactitud las características de los parámetros a medir en cualquier punto de la cuenca.*

*A partir de la constitución del INRH en agosto de 1962 se comienza a intensificar las redes para el control del ciclo hidrológico en general.*

*El surgimiento de las redes de control de la calidad de las aguas en Cuba está íntimamente relacionado con el desarrollo socioeconómico del país.*

*El número de estaciones de la REDCAL actual (año 2004) es de 2264 integrada por 839 fuentes superficiales y 1325 fuentes subterráneas, donde se realizarán un total de 63803 determinaciones a diferentes parámetros físico químicos y bacteriológicos durante el año en curso, para conocer las variaciones en la calidad de las aguas que permita tomar las medidas necesarias en caso de pérdida de calidad según el uso de dicha fuente.*

**Palabras clave:** red de monitoreo, ciclo hidrológico, control

## INTRODUCCIÓN

### Redes de Monitoreo

Se define como red de monitoreo aquel grupo de estaciones seleccionadas para el control sistemático de determinado parámetro a medir en un área o territorio de acuerdo a una frecuencia elegida de antemano.

Una red es un sistema organizado para la recolección de información de una clase específica, donde sus partes componentes deben estar relacionados unas con otras esto es cada estación, dentro de un área, territorio o cuenca dada, las cuales deben llenar las lagunas que puedan quedar tanto en espacio como en el tiempo. La densidad de las diferentes redes de monitoreo está en función del área del territorio que debe abarcar y de la finalidad del estudio.

Una red óptima tiene la finalidad de realizar una ejecución satisfactoria de un programa definido de monitoreo, obtenido en los diferentes puntos de observación que permitan determinar con exactitud las características de los parámetros a medir en cualquier punto de la cuenca.

En la 8° reunión de la comisión hidrológica de la OMM, realizada en 1988, se definieron la categorización de las redes en Básicas, Secundarias y Especiales y para el caso de las redes de Calidad se han definido en Básica y de Control y Vigilancia.

En nuestro caso el diseño de una red para el control sistemático de la cantidad y calidad de las aguas lleva implícito un conjunto de Redes de monitoreo con la siguiente:

### **Fundamentación y objetivo**

Son aquellas redes que están fundamentadas en el principio de la territorialidad, para mantener un control sistemático de las cuencas superficiales y subterráneas, zonas y tramos hidrogeológicos en lo referente a niveles, volúmenes y calidad de las aguas superficiales y subterráneas para la elaboración de cálculos del balance de las aguas superficiales y de reservas de las aguas subterráneas. El potencial hídrico de un territorio se determina por el comportamiento del año hidrológico, el cual a su vez está definido por las características interanuales de las precipitaciones.

Las redes para el control de la cantidad de aguas que permiten realizar el cálculo del balance de agua superficial son la red Evaporimétrica, redes Pluviométricas y la red Hidrométrica, para el caso de las aguas superficiales.

### **Las redes hidrológicas**

Existen diferentes tipos de redes hidrológicas: la red hidrogeológica, la pluviométrica, la pluviográfica la hidrométrica, la hidrometeorológica o climática, dentro de ellas la evaporimétrica, las cuales permiten monitorear la cantidad de lluvia caída, la evaporación y el gasto de los ríos en una cuenca área o territorio dado, además de otras variables climáticas, a través de las cuales se realiza el balance del agua regulada o no.

La creación de un fuerte movimiento de observadores pluviométricos voluntarios el cual en la actualidad cuenta con más de 1500 compañeros que con un elevado espíritu de trabajo y desinterés material garantizan la observación diaria de la lluvia, constituye uno de los mayores logros de la Revolución en el campo del monitoreo de las variables del ciclo hidrológico.

La red pluviométrica en todo el país, desde el principio, estuvo llamada a ser la red más socorrida, la red estratégica, debido a sus relativos bajos costos de operación y mantenimiento. Respecto a la red hidrométrica o de medición de los caudales de los ríos, esta última, con mayores requerimientos técnicos y por tanto más cara, contó con menor número de estaciones, a pesar de poseer una superioridad demostrada en cuanto a la calidad y oportunidad de sus mediciones para fundamentar los proyectos hidráulicos.

En el caso particular de las aguas superficiales la densidad de estaciones para el control de la calidad, puede no ser la recomendada, pues debe tenerse presente el vertimiento de aguas residuales y hay que evaluar el impacto de éstas sobre la calidad de las aguas, por lo cual deben situarse estaciones aguas abajo de la zona de mezcla para poder evaluar el efecto que dicho vertimiento ejerce sobre la calidad de las aguas superficiales de acuerdo al uso de la misma. Deben existir tantas estaciones como focos contaminantes viertan a cada corriente superficial. Es importante controlar las aguas superficiales que desembocan en la plataforma marina o al mar, pues éstas pueden contaminar las zonas costeras y contaminar hasta los peces, como fue el caso de la contaminación por mercurio sucedida en el Japón donde ocurrió una gran intoxicación por ingestión de mercurio a través del consumo de pescado en la ciudad de Minemata.

Densidad mínima de Estaciones Recomendadas por área en km <sup>2</sup>				
Zonas	Estaciones Pluviométricas	Estaciones Evaporimétricas	Estaciones Hidrométricas	Estaciones para el Control de Calidad
Costeras	1/ 900 km <sup>2</sup>	1/50000 km <sup>2</sup>	1/2700 km <sup>2</sup>	1/55000 km <sup>2</sup>
Montañosas	1/ 250 km <sup>2</sup>	1/50000 km <sup>2</sup>	1/1000 km <sup>2</sup>	1/20000 km <sup>2</sup>
Llanuras planas	1/ 575 km <sup>2</sup>	1/50000 km <sup>2</sup>	1/1875 km <sup>2</sup>	1/37500 km <sup>2</sup>
Onduladas	1/ 575 km <sup>2</sup>	1/50000 km <sup>2</sup>	1/1875 km <sup>2</sup>	1/47500 km <sup>2</sup>
Pequeñas islas	1/ 25 km <sup>2</sup>	1/50000 km <sup>2</sup>	1/300 km <sup>2</sup>	1/6000 km <sup>2</sup>
Areas Urbanas	1/ 10-20 km <sup>2</sup>			

En el caso de Cuba al realizarse la optimización de las redes hidrológicas, la distancia máxima entre pluviómetros obtenida por triangulación se encuentra entre 11 y 15 km., lo cual significa que existe una estación cada 55 km<sup>2</sup>.

## RED BÁSICA PARA EL CONTROL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

### *Red Hidrogeológica*

Las redes de pozos de observación sistemática existían en Cuba, en unas pocas cuencas, desde hace varias decenas de años. Ya en la década de los años 50 se establecieron pozos de observación de niveles y de muestreo hidroquímico en pozos situados en la cuenca Vento, Ariguanabo y sur de la antigua provincia de La Habana, con el objetivo de controlar el comportamiento de dichas cuencas que eran las principales fuentes de abasto a la capital. También en Pinar del Río se establecieron pozos de observación en algunas zonas de la costa sur de dicha provincia, con el propósito de controlar las cuencas subterráneas en las zonas arroceras.

Esta Red es la que controla el estado instantáneo en los períodos claves, del ciclo hidrológico seco o lluvioso. La misma es utilizada en la confección de mapas de equipotenciales y para la evaluación de los recursos y reservas de las aguas subterráneas, la cual es medida según las estaciones del año (período seco o poco lluvioso y en el período húmedo o lluvioso) además con la ayuda de la misma se conoce la dirección y sentido del flujo subterráneo.

A partir de la constitución del INRH en agosto de 1962 se comienzan a intensificar las redes de pozos y los trabajos hidrogeológicos en general.

De este modo, crecieron estas redes, en respuesta a la gran cantidad de investigaciones hidrogeológicas que se acometían y a la necesidad de información sistemática en todas las cuencas del país.

En el período del 75 al 78 se desarrolló el proyecto de la red básica nacional elaborado por especialistas búlgaros y cubanos, que si bien era técnicamente superior, muy argumentado y exigente, en la práctica mostraba deficiencias tanto en la ubicación de muchos de los puntos como en la densidad excesiva de las redes. En los años 80 –81, se realizó un primer intento de reajuste de esta red, racionalizando muchos pozos y tratando de hacer más representativas las observaciones.

En 1981 se crea la red informativa mensual para satisfacer las necesidades de la red hidrogeológicas y de control operativo del estado de los acuíferos.

Desde entonces la evolución de las redes ha respondido, esencialmente, a las necesidades de las actividades hidráulicas, para dar respuesta a la argumentación del diseño de obras hidráulicas y su

posterior explotación, teniéndose en cuenta que actualmente la capacidad de embalses construidos representan 9.6 km<sup>3</sup> y cerca de un millón de hectáreas de tierras bajo riego.

## IMPORTANCIA DEL DATO BÁSICO HIDROGEOLÓGICO

Su importancia estriba en que de la obtención correcta del dato básico depende después el procesamiento secundario de los trabajos a ejecutar desde el punto de vista hidrogeológico y el mismo está sujeto al ordenamiento estadístico, evaluación de los recursos y reservas de las aguas subterráneas, para poder brindar de forma eficaz y segura a las instancias superiores del estado sobre el ascenso y descenso del nivel de las aguas subterráneas así como de la calidad y cantidad del agua en general.

## CLASIFICACIÓN DE LAS REDES HIDROGEOLÓGICAS

**Red Informativa.** Es aquella destinada para brindar una información mensual, su objetivo fundamental es alertar a las autoridades superiores del estado de las cuencas en el país. Las mismas están divididas en cuencas de categoría I y II y en su totalidad están relacionadas con los GCBAS (Gráfico de Control de Balance de las Aguas Subterráneas), con la ayuda del cual se toman decisiones de restricción o no de las cuencas en explotación.

En la actualidad la Red Informativa consta de 439 pozos de observación de niveles estáticos; de ellos tenemos 9 limnógrafos y 442 pozos de sondeo manual, dicha red representa el 19 % de la red total nacional distribuida en todo el país en las principales cuencas, zonas y tramos hidrogeológicos más importantes, la misma en lo referente a su acondicionamiento es una de las más atendidas.

**Red de Sondeo Semestral:** Es aquella red que está representada en todo el territorio nacional y que controla el estado instantáneo en los períodos claves del ciclo hidrológico en el estado de la cuenca. La información obtenida es utilizada en la confección de mapas de equipotenciales y para la evaluación de los recursos y reservas de las aguas subterráneas, la red consta con una densidad de 1621 pozos lo que representa el 69% de la red total, la cual es medida dos veces al año (período seco y en el período húmedo) además con la ayuda de ella conocemos la dirección y sentido del flujo subterráneo.

**Red Hidroquímica Vertical (Batometría).** Consta en la actualidad con 321 pozos lo que representa el 14% de la red total nacional y las mismas están destinadas a aquellas provincias que presentan problemas de salinidad en los acuíferos.

Dicho muestreo se ejecuta dos veces en el año con lo cual se realizan otros trabajos que determinan el avance de la cuña salina. Actualmente consta con 53 pozos obstruidos, 87 pozos a perforar, 138 pozos por rótulos, 184 base, 79 cerca, 113 tapas.

Esta red es en la actualidad por su deterioro la más afectada, ya que por problemas de equipamientos (Batómetros ya que hacen falta para su monitoreo como mínimo 45 equipos) hace más de 10 ó 12 años que no se toman muestras en la mayoría de las provincias y su mantenimiento en el ámbito nacional no es bueno.

**Red de Muestreo Físico Químico.** Está unida a la Red de Calidad del Agua (REDCAL). La misma consta con un total de 1042 pozos; el muestreo se realiza fundamentalmente en los pozos de explotación (muestreo dinámico) al final de los períodos secos y húmedos de cada año. El objetivo principal es conocer la composición química del agua que llega a los usuarios. Esta red representa el 44% de la red hidrogeológica.

El trabajo de implementación y desarrollo de las redes de observación de las variables del ciclo hidrológico con las que cuenta el país, operadas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos a

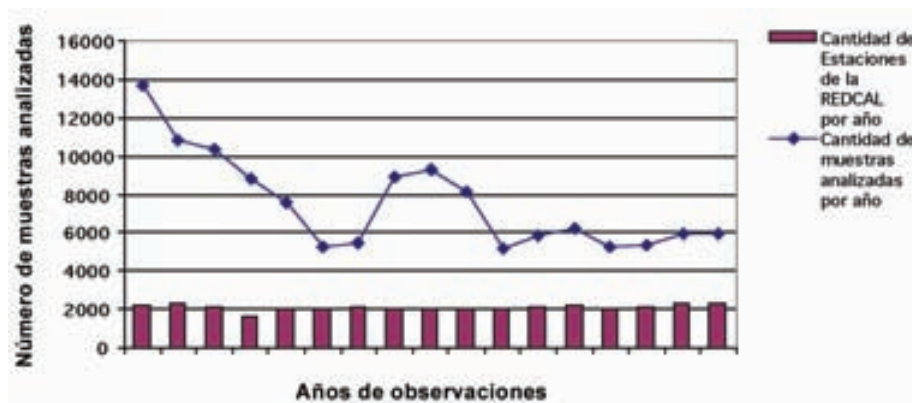
través del Servicio Hidrológico Nacional, constituye un aspecto importante en el desarrollo hidráulico de la nación.

## REDES PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS

El monitoreo sistemático de la calidad de las aguas se realiza a través de la Red de Calidad de las Aguas, REDCAL, que constó en el 2005 con 2323 estaciones, de ellas 1430 estaciones básicas de Monitoreo y 893 para el Control y Vigilancia de la calidad de las aguas en todo el territorio nacional.

Todos estos tipos de redes para ser eficientes deben contar con un número de estaciones que sea representativo de la cuenca, área o territorio dado, lo que depende en muchos casos de la facilidad de acceso, contar con el personal que realice las mediciones con la periodicidad requerida y el costo de la operación de dichas redes y de los objetivos del estudio a realizar.

Tipo de Redes	Densidad de Estaciones por km <sup>2</sup>
Red Básica	1 est./37-42 km <sup>2</sup>
Red de Calidad, densidad de estaciones por km <sup>2</sup>	
Grandes Cuencas	1 est./1600 km <sup>2</sup>
Pequeñas Cuencas caso de Cuba	1 est./25-40 km <sup>2</sup>



*Gráfico de cantidad de muestras analizadas durante el período 1989-2005 de acuerdo a la cantidad de Estaciones de la REDCAL*

Las densidades de ubicación de estaciones según el área en km<sup>2</sup> de las cuencas o territorios objeto de estudio que se establecen para las diferentes redes antes enumeradas según la literatura internacional son las siguientes:

El surgimiento de las redes de control de la calidad de las aguas en Cuba está íntimamente relacionado con el desarrollo socioeconómico del país. Entre 1962-1975: Vladskotsky y col. diseñaron la red de monitoreo físico-químico y barométrico de las aguas subterráneas. A partir del año 1968 se inició un trabajo sistemático en el diseño e implementación de estas redes. En la década del 1970, comenzó el nuevo diseño de las redes hidroquímicas basado en criterios científicamente argumentados.

Los antecedentes de la REDCAL se remontan a las actividades de recolección de muestras, análisis y evaluación que desarrollaban territorialmente las diferentes instancias del INRH en el ámbito provincial. Gutiérrez en 1980 propuso los elementos básicos de la “Red Nacional de Observación Sistemática de la Calidad de las Aguas y Control de la Contaminación” (REDCAL).

Esta Red se orientó al monitoreo de los principales cuerpos de agua y elementos del ciclo hidrológico, tratando de reflejar las relaciones entre el ecosistema, sus características, el uso de las aguas y su manejo, así como, la identificación y determinación de las variables indicadoras de la calidad y de la frecuencia de muestreo.

Las funciones organizativas de la operación de la REDCAL deben sustentarse sobre una base económica que propicie la operación, el mantenimiento, el desarrollo y la modernización sistemática del equipamiento necesario para la mejor operación de las redes, a fin de garantizar los siguientes aspectos:

Tareas operativas: relacionadas con la obtención de los datos (muestreo y análisis de laboratorio) provenientes de las redes y prestación del servicio informativo de la calidad de las aguas.

Tareas aplicadas: encaminadas a la evaluación de la calidad de las aguas, su variabilidad y distribución espacio temporal.

Tareas científicas: dirigidas a resolver problemas de carácter aplicado y profundizar en el conocimiento de los procesos hidroquímicos.

Disponibilidad a corto plazo de los diferentes tipos de datos.

Alta resolución espacial y temporal de la información capaz de mostrar las distribuciones regionales y destacar las áreas relevantes.

Alta confiabilidad. Largas series de datos.

El número de estaciones de la REDCAL actual (año 2003) es de 2121 integrada por 796 fuentes superficiales y 1325 fuentes subterráneas, donde se realizarán un total de 68300 determinaciones a diferentes parámetros físico químicos y bacteriológicos durante el año, para conocer las variaciones en la calidad de las aguas según su uso que permita tomar las medidas necesarias en caso de pérdida de calidad según el uso de dicha fuente, con el objetivo de proteger las cuencas subterráneas y superficiales y la calidad de sus aguas.

## REFERENCIAS

1. GUTIÉRREZ DÍAZ, J. 1980 Términos de referencia para la elaboración de la Red Nacional de Observaciones Sistemáticas de la Calidad de las Aguas de la República de Cuba, Ciudad de La Habana. Folleto interno del INRH, 10 pág.
2. OMM.1988. Informe de la Octava Reunión de la Comisión de Hidrología de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.



**LE PROGRAMME CARAÏBE-HYCOS:  
UN EXEMPLE DE COOPÉRATION RÉGIONALE DANS LES DOMAINES DE  
L'ENVIRONNEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE**

**EL PROGRAMA CARIBE-HYCOS:  
UN EJEMPLO DE COOPERACIÓN REGIONAL DENTRO DE LOS DOMINIOS DEL  
MEDIO AMBIENTE Y EL DESARROLLO SUSTENTABLE**

**THE CARIBE-HYCOS PROGRAMME:  
AN EXAMPLE OF REGIONAL COOPERATION RELATED TO THE ENVIRONMENT  
AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

*BERNARD THÈBE*

*Institute for Research and Development  
OBH-BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5  
Tél: +33 (0)4 67 91 72 60  
Fax : +33 (0)4 67 91 72 69  
Courrier : thebe@mpl.ird.fr*

*ALAIN LARAQUE*

*Institute for Research and Development  
OBHI-BP 8006 - 97259 Fort de France, France  
Tel: (0033) 05.96.59.17.18  
Fax: 05.96.50.32.61  
Courrier: alain.laraque@ird-mq.fr*

**Mot clef :** *programme CARAÏBE-HYCOS, coopération*

## **INTRODUCTION**

Le démarrage du programme Caraïbe-HYCOS est prévu courant 2006. Il contribuera à l'évaluation, au suivi et à la gestion des ressources en eau (en quantité et qualité) de l'arc insulaire des Caraïbes. Il s'insère dans la constellation des programmes régionaux HYCOS (fig. 1) menés à l'échelle mondiale dans le cadre du WHYCOS (World Hydrological Cycle Observation System), sous l'égide de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale).

Ce programme d'envergure régionale, qui devrait être soutenu par les Collectivités Territoriales de la Martinique et par le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional), sera piloté par l'IRD en Martinique qui recueillera les informations provenant des îles partenaires à partir d'un réseau d'observatoire hydrologique. Ces données seront homogénéisées puis centralisées dans une banque régionale, facilement consultable par les utilisateurs. Leur circulation sera promue ainsi que le transfert de technologies, la formation et par voie de conséquence l'émergence d'une communauté d'hydrologues à l'échelle des Caraïbes.

Cette nouvelle approche régionale des ressources en eau devrait permettre d'une part, d'établir leurs « états des lieux » et d'autre part, de mieux étudier pour mieux les prévoir, leurs évolutions spatio-temporelles. N'oublions pas que les cours d'eau sont les témoins des perturbations naturelles (éruptions volcaniques, glissements de terrain...), et anthropiques (pollutions diffuses et accidentelles...) ou d'origine mixte (climat...). Leurs rejets dissous et solides affectent le « bassin » circonscrit de la mer des Caraïbes d'environ 2 millions de km<sup>2</sup>, dont les fragiles écosystèmes littoraux jouent un rôle crucial dans les économies locales (pêche, tourisme...). Il est à espérer qu'une meilleure

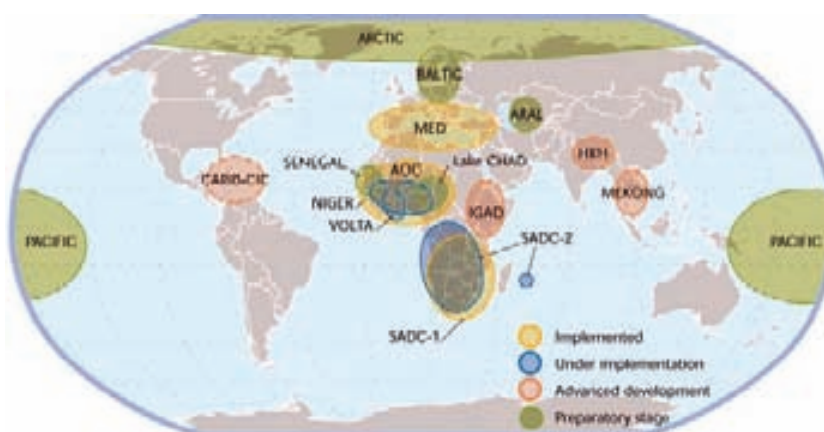
connaissance et compréhension des causes et des conséquences de ces évolutions permettra d'en assurer une meilleure maîtrise au bénéfice des populations locales.

Caraïbe-HYCOS permettra à la Martinique d'exercer un certain rayonnement dans le domaine de l'environnement et du développement durable. Les questions autour de l'eau concernent en particulier les dimensions environnementales « Pollution et qualité des milieux », « Ressources naturelles », « Risques naturels et anthropiques » présentes dans les Eléments de cadrage, relatifs au diagnostic territorial.

En conclusion, l'apport le plus significatif à long terme de Caraïbe-HYCOS sera la disparition des barrières nationales facilitant l'approche intégrée de la gestion des ressources en eau. Le partage de l'information, la création de centres d'excellence régionaux et la mise en place de programmes de formation et d'éducation amélioreront très significativement la manière dont la région Caraïbe considérera les questions de ressources en eau au cours de ce nouveau millénaire.

## RAPPEL DU CONCEPT GÉNÉRAL DE WHYCOS

Le concept de Système Mondial d'Observation du Cycle Hydrologique (WHYCOS pour World Hydrological Cycle Observing System) a été développé par l'OMM afin de renforcer, à leur demande, la capacité de ses états membres à acquérir, archiver et utiliser les données sur leurs ressources en eau. L'objectif de développement de WHYCOS est de fournir une base scientifique pour l'évaluation des ressources en eau, leur développement et leur gestion sur un mode intégré, intersectoriel et international. Il a pour but de faciliter les collaborations entre groupe régionaux d'Etats membres. Le concept de WHYCOS est mis en place à travers d'une approche à deux niveaux, totalement intégrés, dans laquelle WHYCOS fournit le cadre et la stratégie générale et les différents HYCOS assurent la mise en œuvre du projet au niveau d'un bassin ou d'une région, en réponse aux besoins spécifiques des utilisateurs finaux des données hydrologiques. Un certain nombre de HYCOS sont aujourd'hui opérationnels et d'autres sont en cours de conception. Les composantes régionales de WHYCOS – telles que Caraïbe-HYCOS doivent agir comme outils pour l'amélioration de la collecte, de la diffusion et de l'exploitation de données hydrologiques de qualité, standardisées et pertinentes au niveau des états, des bassins, des régions et au niveau international. La quantité d'eau disponible, tout comme sa qualité sont importantes et les données collectées doivent être facilement accessibles aux utilisateurs à partir d'une base de données reliée aux réseaux de communication internationale (Internet) pour le bénéfice des différents secteurs socio-économiques. L'initiative WHYCOS fournit une base idéale et un cadre pour la coopération régionale dans le suivi et l'évaluation des ressources en eau, pour le développement intégré et la gestion de ces ressources au niveau de la communauté, du bassin, du pays, de la région, du continent et au niveau global. WHYCOS contribue à l'acquisition des connaissances sur les processus hydrologiques dans leur interaction avec le climat et l'environnement et encouragera l'échange de données entre les secteurs d'activités dans le but d'un développement durable.



## LE PROJET CARAÏBE-HYCOS

La mise en place du projet Caraïbe-HYCOS a été proposée par le Groupe de Travail sur l'Hydrologie de l'Association Régionale OMM IV en Octobre 1995, elle a été reprise par la Conférence sur l'Évaluation des Ressources en Eau et les Stratégies de Gestion en Amérique Latine et aux Caraïbes (San José, Costa Rica, Mai 1996) et par la douzième session de la AR IV de l'OMM (Mai 1997). Le projet Caraïbe-HYCOS couvrira la plupart des pays du Bassin de la Mer des Caraïbes, mais il sera divisé en deux composantes afin de prendre en compte les différences physiographiques entre les pays d'Amérique Centrale et les îles des Caraïbes, ces composantes sont : (i) la Composante Iles Caraïbes (CIC/Caraïbe-HYCOS) [comprenant les Grandes et les Petites Antilles et la Guyane française] ; et (ii) la Composante Continentale (COC/Caraïbe-HYCOS) [Mexique, Pays Centraméricains, Colombie, Venezuela et Guyana]. Les deux composantes de Caraïbe-HYCOS feront partie intégrante du projet global WHYCOS.

### Pays d'application

L'archipel des Caraïbes est constitué d'un chapelet d'îles s'étirant des Bahamas au Nord jusqu'à Trinidad et Tobago au Sud, et bordant la mer des Caraïbes au Nord et à l'Est. Politiquement, l'archipel est divisé en vingt États et territoires. Les pays qui ont exprimé leur intérêt à participer au projet Caraïbe-HYCOS sont : la Barbade, Cuba, la République Dominicaine, les Antilles Françaises (Guadeloupe et Martinique), Haïti, la Jamaïque, Trinidad et Tobago.



### Diagnostic et nécessité du Projet

Comme la mer des Caraïbes constitue une bonne partie de l'exutoire ultime des eaux drainées par ce cordon insulaire, ces rejets présentent des impacts sur les récifs coralliens, et à terme sur tout un pan des économies locales puisque le littoral marin en représente un des principaux attraits touristiques. Et surtout ces îles sont affectées par des phénomènes récurrents extrêmement violents (cyclones, éruptions volcaniques, glissements de terrain,...), certes sporadiques, mais qui provoquent des transferts hydriques solides et dissous représentant bien souvent la majeure partie des exportations de matières à la mer.

Basé sur le concept WHYCOS de l'OMM, la Composante Iles Caraïbes de Caraïbe-HYCOS a été développée pour répondre aux problèmes énoncés ci-dessus, en tenant compte de la situation particulière des îles-États. L'archipel des Caraïbes est caractérisé par une grande diversité et hétérogénéité tant des points de vue politique et socio-économique que des points de vue culturels

et linguistiques... Le même constat s'applique aux services nationaux gestionnaires des ressources en eau quant à leur organisation, infrastructure, moyens disponibles, stratégies opérationnelles, états d'avancement.

Une certaine homogénéisation de leurs mises à niveau et modernisation s'impose donc pour faciliter et promouvoir l'émergence d'une communauté régionale d'hydrologues caribéens.

### **Objectifs du projet**

Le projet pourrait englober différentes composantes dans chaque pays participant, qui, prises dans leur ensemble, participeront grâce à une coordination régionale, à la construction de compétences nationales nécessaires à l'acquisition et à la gestion de données sur les ressources en eau et à la prévention des catastrophes naturelles.

Le projet Composante Iles Caraïbes de Caraïbe-HYCOS (CIC/Caraïbe-HYCOS) présentera les objectifs de développements suivants :

- Réduire les pertes en vies humaines et les dégâts matériels causés par les catastrophes naturelles, à l'aide de l'exploitation de systèmes de prévision et d'alertes de crues, et ainsi améliorer les compétences à prévenir les conséquences des catastrophes naturelles.
- Soutenir le développement durable et la gestion intégrée de l'eau, sur la base d'une connaissance fiable des ressources en terme de quantité, de qualité et d'utilisation, et aboutir ainsi à un renforcement des compétences en gestion de l'eau.
- Augmenter les échanges d'informations et d'expériences, plus particulièrement lors des catastrophes naturelles, en suscitant des coopérations régionales sur les ressources en eau et,
- Développer des compétences techniques (via la formation et le transfert de technologies) adaptées aux conditions et aux réalités de chaque pays, en promouvant la formation dans les instituts nationaux.

### **Objectifs immédiats**

- Contribuer à la mise en œuvre du réseau mondial de stations hydro-météorologiques de référence, avec télétransmission des données en temps réel via satellites,
- Acquérir une meilleure connaissance des phénomènes hydro-météorologiques régionaux et de l'évolution de l'environnement,
- Moderniser les réseaux hydro-météorologiques dans la région Caraïbes,
- Favoriser les échanges de données fiables et homogènes sur les ressources en eau et l'environnement à des fins de recherche,
- Promouvoir les actions de coopération régionale, en particulier dans les domaines suivants:
  - Échanges technologiques en matières d'acquisition et de traitement des données,
  - Création de bases de données nationales et régionales,
  - Mise à disposition de systèmes d'information hydrologique,
  - Partage des données et de l'information dans la perspective d'études régionales et globales,
  - Mise en place de programmes régionaux de formation.

### **Composantes du projet**

Le projet CIC/Caraïbe-HYCOS sera structuré en trois composantes principales: (I - Prévention des catastrophes; II - Base de connaissances sur l'eau, III – Coopération régionale).

Bien que les coopérations régionales soient bien établies dans le domaine de la météorologie, elles sont, à quelques exceptions près, quasiment inexistantes pour ce qui concerne l'hydrologie. L'intérêt et les avantages potentiels de la coopération régionale dans la gestion des ressources hydrologiques et la gestion de problèmes communs de ressources en eau ne sont pas apparus clairement auprès

de services nationaux. Les phénomènes hydrologiques et météorologiques ne se limitent pourtant pas aux frontières nationales. Les services d'observation et d'interprétation de données de taille modeste, comme c'est le cas dans les Îles de la Caraïbe, pourraient retirer des avantages importants du partage des données, et sans doute, de la mise en commun des expertises à l'occasion de projets spécifiques.

Plus généralement, l'amélioration de la coopération régionale au sein des Caraïbes, en terme de gestion des ressources hydrologiques et de problèmes environnementaux, est un sujet d'importance majeure. En effet, les progrès qui seraient réalisés dans ce domaine pourraient avoir un impact considérable sur le développement socio-économique de la région, bien au-delà des questions de ressources en eau.

### Gouvernance du projet

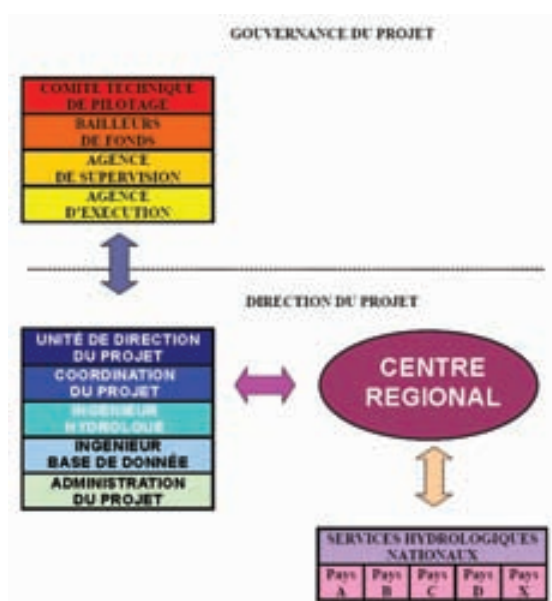
Le projet sera mis en œuvre avec les ressources humaines et matérielles de l'Agence d'Exécution (IRD), des Services concernés de la Martinique et des Services Hydrologiques Nationaux des pays participants au projet, sous la supervision de l'OMM.

Le Comité de Pilotage du Projet est composé d'un représentant de chaque pays membre du projet Caraïbe-HYCOS, d'un représentant de l'Agence d'exécution (IRD), d'un représentant des bailleurs de fonds et d'un représentant de l'Agence de supervision du projet (OMM).

L'Agence d'exécution du projet fournira l'assistance nécessaire aux SHN dans les pays partenaires pour assurer le succès des installations de terrain du projet. Elle accueillera le Centre Régional (CR) et mettra en place une unité responsable de l'exécution du projet. Cette unité d'exécution sera constituée du coordinateur, d'un ingénieur hydrologue et d'un ingénieur informaticien bases de données et/ou électronicien, d'un(e) assistant(e) administratif (ve).

### CONCLUSIONS / PERSPECTIVES

L'évolution des ressources hydriques à la fois dans l'espace et le temps, tant en termes quantitatifs que qualitatifs et l'étude de leurs causes (anthropiques, naturelles, climatiques...) et de leurs conséquences constituent une problématique intéressant en premier lieu la Société Civile. Tout comme pour la veille climatologique, la veille hydrologique ne trouvera tout son intérêt et sa justification que dans la durée. Ces véritables Observatoires des évolutions de l'environnement doivent se pérenniser tant il est admis que la compréhension de leurs causes, processus et devenir, ne peut s'établir qu'à l'aide de séries chronologiques longues et de qualité. Il semble évident que



la première période (2006-2008) de lancement de la composante insulaire (CIC) du projet Caraïbe-HYCOS devra se poursuivre et s'améliorer par la suite et il serait louable qu'elle soit complétée par le lancement de sa composante continentale (COC) lors d'une deuxième période qui cadrerait toujours parfaitement dans la thématique: « environnement et développement durable » de la préparation des programmes opérationnels 2007-2013 et des prochains Contrats Etat-Collectivités. Ainsi dans la continuité de son expansion, la COC bénéficierait des acquis, compétences, expériences de la CIC.

Comme le fonctionnement des bassins versant passe par une bonne connaissance de leurs caractéristiques physiographiques, les deux composantes insulaires et continentales de Caraïbe-HYCOS auront tout avantage à se rapprocher du **Projet SEAS Guyane « Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite »**. En effet, il s'agit là d'une Plate forme technologique d'acquisition et traitement des images des satellites SPOT 5 et ENVISAT qui est opérationnelle depuis début 2006 pour favoriser la recherche, la formation et le développement durable en Amazonie et dans les Caraïbes ainsi que le développement de la coopération scientifique régionale transfrontalière entre Guyane, Brésil et Caraïbes.



La mise en place par l'IRD de cette station de réception à haute résolution est unique en Europe et en Amérique du Sud. Elle sera dédiée au développement d'activités de recherche, de formation et de services opérationnels en prise directe avec le développement régional et oeuvrera à travers un accès gratuit des données pour la recherche, notamment pour favoriser des pôles de compétence régionaux (Guyane, Brésil, OTCA, Caraïbes...).

Dans de telles approches liant recherche et environnement, Caraïbe-HYCOS attendra beaucoup, notamment au travers de l'utilisation des images satellites, de l'échange de données inter institutionnelles concernant les risques naturels, la couverture végétale, l'urbanisation, la cartographie des biocénoses marines, etc. Un croisement de ces informations impliquera la collaboration des différents utilisateurs (Cirad, DDE, DIREN, Ifremer, IPGP, PNRM...), chacun mesurant des paramètres spécifiques, mais néanmoins interdépendants dans leur grande majorité.

L'interaction Caraïbe-HYCOS-SEAS paraît d'ores et déjà très fédératrice et prometteuse.

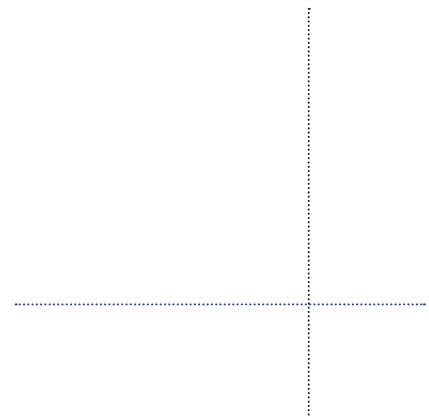


**CAPITULO 2**

**EXTREMOS HIDROLÓGICOS**

**CHAPTER 2**

**HYDROLOGICAL EXTREMES**







# COMPARATIVE HYDROLOGICAL DROUGHT-FLOOD RISK MODELING IN NORTHERN MEXICO AND WEST AFRICAN SAHEL REGION

## MODELO COMPARATIVO DE RIESGO DE SEQUIA HIDROLOGICA E INUNDACION EN EL NORTE DE MEXICO Y LA REGION OESTE AFRICANA SAHARIANA

ALFONSO GUTIÉRREZ-LÓPEZ

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA  
Subcoordinación de Hidrología y Mecánica de Ríos

Paseo Cuauhnáhuac 8532

C.P. 62550, Jiutepec

Morelos, México

E-mail: agutierrez@tlaloc.imta.mx

HUBERT ONIBON

Groupe Afriturible International, GAI

sarl 02 BP 1567 Cotonou

République du Bénin, Afrique

Tél: (229) 33 06 88

E-mail: hubert.onibon@afriturible.com

### ABSTRACT

*West Sahel Africa is a wide stretch of land running from the Atlantic Ocean to Niger; it is a transition zone between the arid Sahara to the north and the wetter more tropical area to the south (15°-25°N). Northwest Mexico is an essentially transition tropical-desert zone (23°-28°N). Both regions are touched by two different rainfall regimes producing either extreme precipitation conditions or severe droughts. This paper presents a stochastic model of rainfall distribution and its rationalization. The rainfall regime is described by two parameters: the mean event rainfall and the daily mean number of events during a given period (Leak distribution). The method is applied to West Sahel Africa and Northern Mexico and the comparative hydrological drought-flood risk modeling itself is carried out in a geostatistical framework. The results obtained are compared to those obtained by a direct fitting of a Gumbel distribution to series of extreme values.*

**Key words:** flood, drought, leak distribution, regionalization, West African Sahel, Northwest Mexico.

### INTRODUCTION

Extending from 15°N to 25°N, West African Sahel is a wide stretch of land running from the Atlantic Ocean to Niger; it is a transition zone between the arid Sahara to the north and the wetter more tropical area to the south. In this case, Northwest Mexico is essentially a transition tropical-desert zone located from 15°N to 20°N characterized by the frequent occurrence of extreme rainfall, causing floods and severe damages to growing and long periods of drought. The climates of the West Sahel and Northwest Mexico are typically an arid and unstable environment. The Sahel area is a predominantly sparse savanna vegetation of grasses and shrubs. Northern Mexico is covered

by desert vegetation, including mesquite, cactus, desert scrub, and some grasses. Over the recent years, both regions are touched by two different rainfall regimes producing either extreme precipitation conditions or severe droughts. In such a context, the development of robust methods of regionalization is needed as a starting point for water resources planning and risk prevention. This paper presents a stochastic model of rainfall distribution and its regionalization. The analytical formulation of the model and some of its main properties are recalled. The rainfall regime is described by two parameters: the average rain depth per event and the mean number of events during a given period (Leak distribution). The method is applied to West African Sahel (Figure 1) and Northern Mexico (Figure 2) and the comparative hydrological drought-flood risk modeling itself is carried out in a geostatistical framework, focusing on three time scales: annual, monthly and daily. The results obtained by the model are compared to those obtained by a direct fitting of a Gumbel distribution to series of extreme values. This provides an integrated approach for the mapping of the hydrological risk over both gauged and ungauged basins.

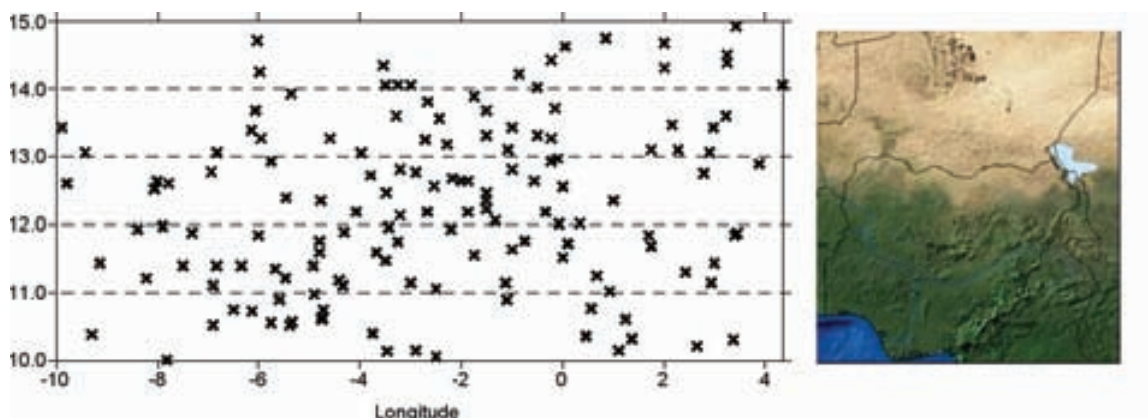


Figure 1 - Recording rain gauge network over the Sahel watershed (145)

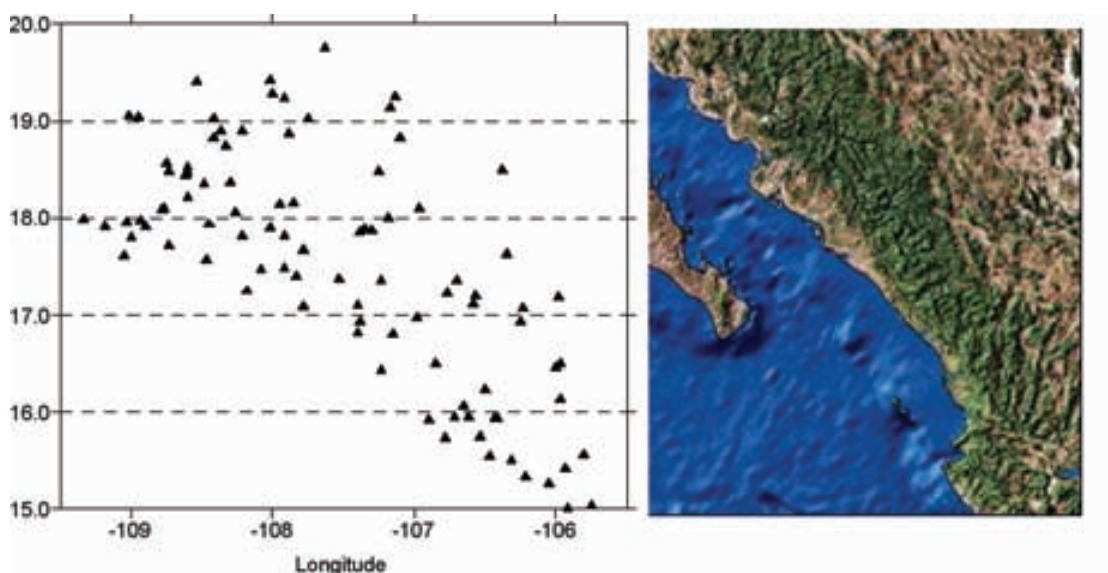


Figure 2 - Recording rain gauge network over the Mexican watershed (95)

## RAINFALL DISTRIBUTION MODEL

The model is based on the hypotheses of a Leak distribution that was developed by Babuziaux, C., (1969), (Electricité de France). This law is commonly used to describe the regime of rainfall in Africa,

mainly in Benin (Le Barbé *et al.*, 2002); in Togo (Seguis, 1988) in Nigeria (Le Barbé and Lebel, 1997; Onibon *et al.*, 2002) and in Burkina Faso by Tapsoba, 1993. The Leak distribution is used generally in the study of rainfall data. The main hypotheses to consider are: (a) Rainfall distribution is a process without memory, (b) depth rain of each event, has an exponential distribution and (c) the number of events registered in a measurement station (days with rain), take a Poisson distribution. In addition to the first hypothesis, if the process is stationary, the mean event rain depth,  $\beta$  follows a law of exponential distribution. It is also possible to deduce that over this period T, the mean number of storms ( $\lambda$ ) assume to be a Poisson distribution. The model itself is basically a Compound Poisson Process with white noise exponential distribution. Therefore the parameter  $\beta$  gives an additional advantage by making possible the deduction of the distribution of the rain over the period  $T' = kT$  from the distribution computed for the period T ( $\beta' = \beta$  and  $\lambda_{T'} = k\lambda_T$ ). where,  $I_1$  is the order one Bessel function

$$f(x, \lambda, \beta) = e^{-\lambda \frac{x}{\beta}} \frac{\lambda}{\beta} \frac{I_1\left(2\sqrt{\frac{\lambda x}{\beta}}\right)}{\sqrt{\frac{\lambda x}{\beta}}} \quad \text{for all } x > 0 \quad (1)$$

#### ***Inference of parameters, Method of Moments***

The most effective inference of parameters procedure depends on the average number of dry days, during the period T. For the case  $n_0 = 0$ , the inference of parameters using the method of moments, can be considered as:

$$\hat{\lambda} = \frac{2\bar{x}^2}{s_x^2} \quad \hat{\beta} = \frac{s_x^2}{2\bar{x}} \quad (2)$$

If,  $n_0 \neq 0$  the estimation procedure requires, for a correct solution, to take into relation the total observed number n of sequences of length T in the sample. By this way, the estimators of the parameters can be obtained as:

$$\hat{\lambda} = \left[ 1 - (2 - \sqrt{2}) \sqrt{\frac{n_0}{n}} \right] \left[ \frac{2\bar{x}^2}{s_x^2} - \text{Log}_e \frac{n}{n_0} \right] + \text{Log}_e \frac{n}{n_0} \quad (3)$$

$$\hat{\beta} = \left[ 1 - (2 - \sqrt{2}) \sqrt{\frac{n_0}{n}} \right] \left[ \frac{s_x^2}{2\bar{x}} - \frac{\bar{x}}{\text{Log}_e \frac{n}{n_0}} \right] + \frac{\bar{x}}{\text{Log}_e \frac{n}{n_0}} \quad (4)$$

#### ***Method of maximum likelihood***

The logarithm of the probability function, whose maximum must be obtained, is the following:

$$L = -\lambda n + \frac{(n - n_0)}{2} \text{Log}_e \frac{\lambda}{\beta} - \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{x_i}{\beta} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-n_0} \text{Log}_e x_i + \sum_{i=1}^{n-n_0} \text{Log}_e I_1 \left( 2\sqrt{\frac{\lambda x_i}{\beta}} \right) \quad (5)$$

Simplifying to the partial derived from L, with respect to  $\lambda$  and  $\mu$  leads to an equations system of the form:

$$-n + \frac{n - n_0}{2\lambda} + \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{I_1'(z_i)}{I_1(z_i)} \frac{z_i}{2\lambda} = 0 \quad (6)$$

$$-\frac{n - n_0}{2\beta} + \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{x_i}{\beta^2} - \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{I_1'(z_i)}{I_1(z_i)} \frac{z_i}{2\beta} = 0 \quad (7)$$

where 
$$z_i = 2\sqrt{\frac{\lambda x_i}{\beta}} \quad (8)$$

$I_1'(z)$  is the first derived of  $I_1(z)$ . Solving the equations system member to member it is obtained:

$$\bar{x} = \hat{\lambda}\hat{\beta} \quad (9)$$

The properties of Bessel function, allow to write the derived of  $I_1$  as:  $I_1'(z) = I_0(z) - \frac{1}{z}I_1(z)$

$I_0$  is the Bessel function of order zero. Using this expression into the equation (6) and by substituting  $\bar{x}$  in equation (8)  $\frac{z_i}{2\lambda} = \sqrt{\frac{x_i}{\bar{x}}}$   $g(\lambda) = \sum_{i=1}^{n-n_0} \frac{I_0(z_i)}{I_1(z_i)} \sqrt{x_i} - n\sqrt{\bar{x}} = 0$  : whose

solution is a single and positive value of  $\lambda$ . The function  $g(\lambda)$  is monotonous and decreasing; its solution is in the interval  $[10^{-4}, 5\lambda_{\text{mon}}]$  where,  $\lambda_{\text{mon}}$  corresponds to the value of the parameter considered by the method of moments. The value  $\hat{\beta}$  is obtained from the expression (9). Le Barbé and Lebel, 1997, proposed an alternative procedure for inference of parameters of the Leak distribution. This method proposes to use the average number of dry days. This procedure has a singular importance because dry days information, is not used directly in the inference of parameters in both the method of moments and the maximum likelihood one. By this way, the parameters shall be given by:

$$\hat{\lambda} = -\text{Log}_e\left(\frac{n_0}{n}\right) \quad \hat{\beta} = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\lambda}} \quad (10)$$

where  $\hat{\mu}$  is an estimation parameter of the first moment of the probability function. In 95 raingauge stations within the Mexican hydrological region n°10 and in 145 raingauge stations in the West Sahel region; were taken into account, and the parameters of the Leak distribution were calculated, with the three previously described procedures. For both regions the considered period of May to October are used with a mean available record period data of 35 years (1947-1990) for the Mexican stations and 20 years (1951-1990) for the African region. Based on the statistical  $\chi^2$ , the best adjustments were selected. In the Mexican region, 14 stations were rejected by the test. In 5 of other ones, the method of maximum likelihood was not convergent. 11 stations were adjusted to normal distribution and the frequency analysis of 65 stations followed the Leak distribution. From these 65 stations, 46 stations are considered as being of excellent quality; thus, they were used in this study. A similar procedure was taken in the African stations (Onibon, 2001). According to the methods of inference of parameters, in most of the cases, the method of moments gives the best adjustment to the samples data. Figure 3 shows the adjustment of daily rainfall in the Mexican Tamazula station (Gutiérrez-López *et al.*, 2005).

## MODEL VALIDATION FOR THE REGIONS OF STUDY

The main advantage of the Leak distribution consists in the possible use of different time intervals. It can be calibrated for different values from  $T$ . The c.d.f. (cumulative distribution function) of the rainfall

accumulated over  $k$  time steps is still a Leak distribution, assuming that an average scale parameter  $\lambda$  can be computed over the duration  $kT$ . When daily data are available, it is strongly preferable to chose  $T$  equal to 1 day see Figure 3. Figures 4, 5 and 6 show the validation of the model. The considered parameters of the analysis of daily rain, the method of moments were:  $\lambda = 0.654$  y  $\beta = 12.214$ . In order to estimate the parameters for 10 –days cumulative rainfall, we obtain:

$\lambda = 0.654 \times 10$  ;  $\lambda = 6.54$  ;  $\beta = 12.214$ . The real values are:  $\lambda = 7.071$  ;  $\beta = 11.465$ .

Then, to obtain the parameters of the monthly rainfall distribution, values are the following ones:  $\lambda = 0.654 \times 31$  ;  $\lambda = 20.274$  ;  $\beta = 12.214$ ; The real values are:  $\lambda = 20.083$  ;  $\beta = 12.33$

## REGIONALISATION OF PARAMETERS

In all the raingauge stations of the Mexican and African regions, the parameters of the Leak distribution day per day during the great wet season from May to October were estimated. This analysis was developed by using a 11 day window (five days before and five after the day N) and enabled us to trace Figures 7 to 12, for instance for the station Tamazula in Mexico. Also for Kindi, Dedougou, Kamboince, Bilanga, Didir, Boulsa, Botou, Bousse, Bourzanga, Bani, Titao, Tiou-ouahigouya, Pobe stations at Sahel region. Figures 7 and 8 shows the evolution of these parameters as an interesting variation of number of storms within the hydrological region 10. It is seeable that near the coast, the parameter  $\lambda$  value has a strong spatial variability. It shows also a great time-variability, during the rainy season. Inversely, in the piedmont and the Sierra Madre, variation are lower. The area of highest values of  $\lambda$  parameter is similar to that of the rainfall annual amount, and is strongly linked to both the topographical pattern and the zonal climate distribution. Thus, the higher values are closer to the coast in the southern region, under a wet tropical climate. In Mexico, at North is located more and more far from the coastal plain, due to the appearance of the dry subtropical climate of the coastal desert (240 mm of annual rainfall at Topolobampo station).

Therefore, at these higher latitudes, there is a strong relation between rainfall and altitude, while in southern areas, the wettest zones are located on the hills near the Pacific Ocean. This is the reason why the parameter spatial distribution is transverse and across the mountain. Although the obvious parallelism of coast and mountain, rainfall distribution determines its own rules, due to the conjunction of global and zonal influences. At the Sahel region, the decrease of rainfall is closely linked to decrease in the number of rainfall events, except in the extreme south. This decrease is especially important for the core of the rainy season (July, August), but in the north (14 to 15°N) it is observed over the whole rainy season. This spatial pattern was detected by Le Barbé and Lebel in 1997. Also two wet periods were detected (1950-1969) and two dry decades (1970-1989).

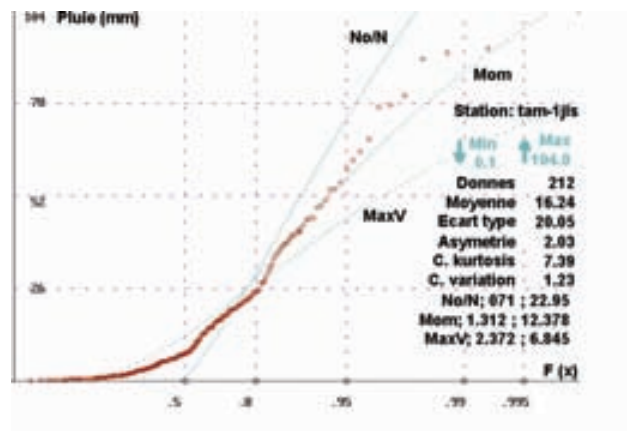


Figure 3 - Tamazula (1961-1985) analysis for 1 July

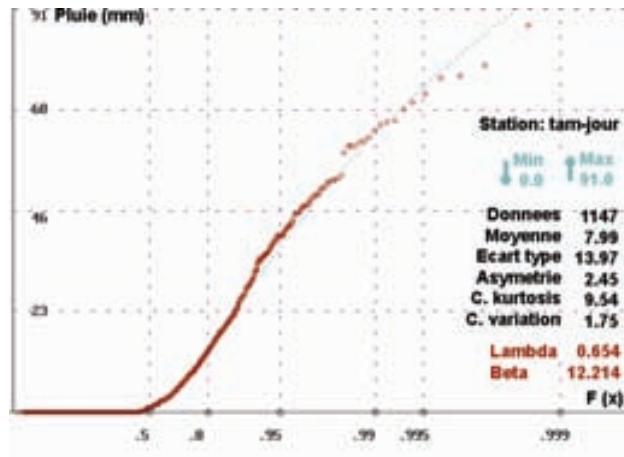


Figure 4 - Tamazula August (1961-1985) - Daily Rainfall Distribution

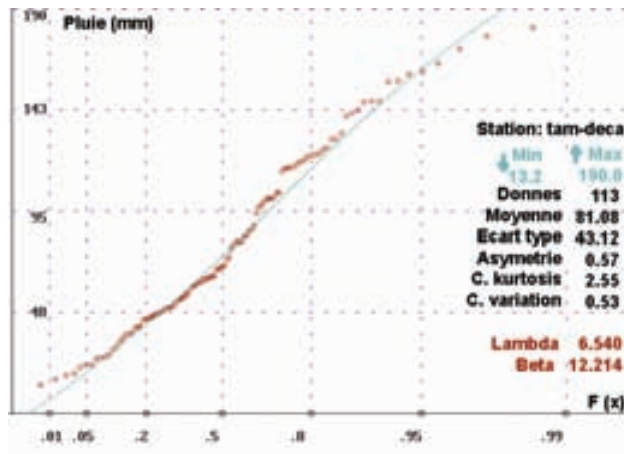


Figure 5 - Tamazula August (1961-1985) 10-Day Cumulative Rainfall Distribution

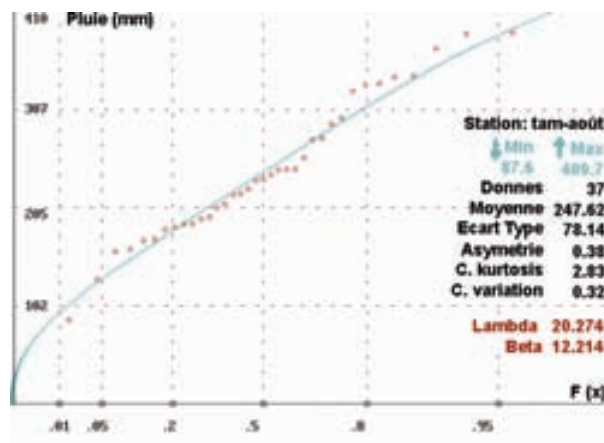


Figure 6 - Tamazula August (1961-1985) Monthly Rainfall Distribution

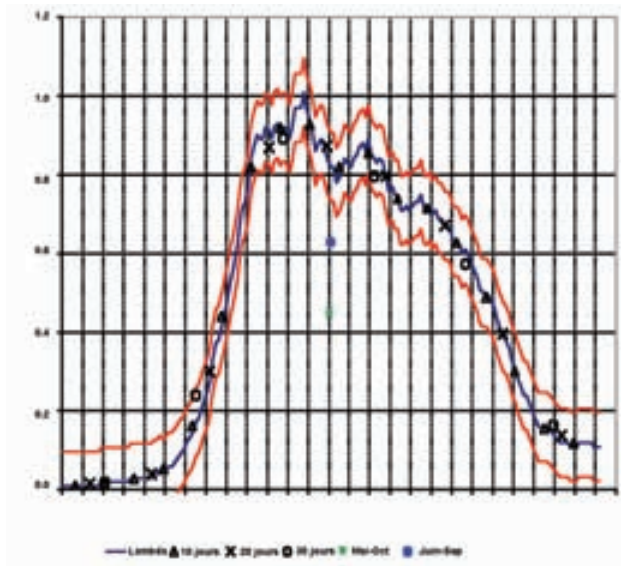


Figure 7 - Tamazula August (1947-1990) - Daily mean number of events

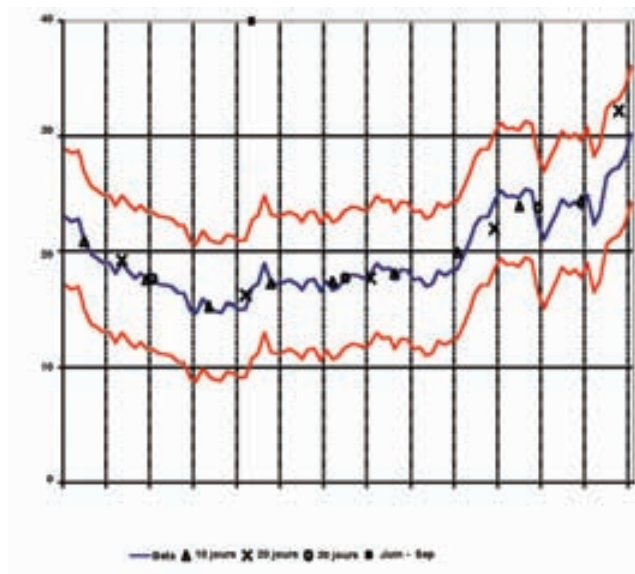


Figure 8 - Tamazula August (1947-1990) - Mean event rainfall distribution

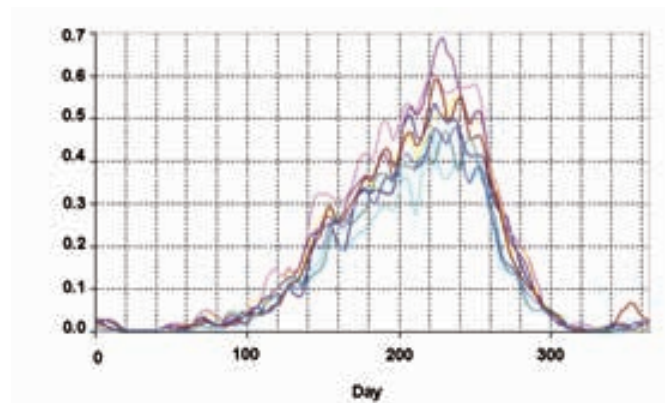


Figure 9 - Kindi, Dedougou, Kamboince, Bilanga, Didir, Boulsa, Botou, Bousse, stations (1951-1990) Daily mean number of events



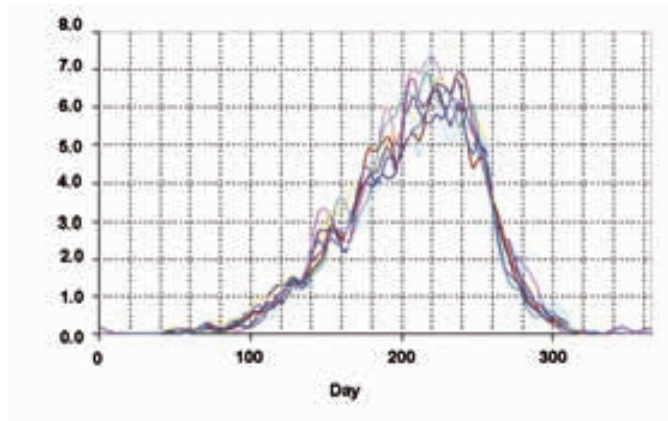


Figure 10 - Kindi, Dedougou, Kamboince, Bilanga, Didir, Boulsa, Botou, Bousse, stations (1951-1990) Mean event rainfall distribution

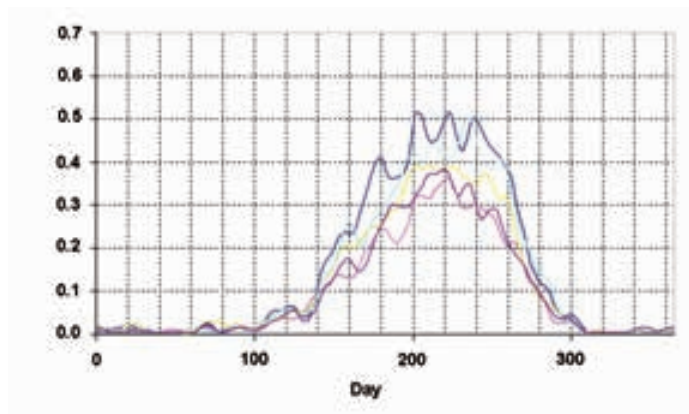


Figure 11 - Bourzanga, Bani, Titao, Tiou-ouahigouya, Pobe, stations (1951-1990) Daily mean number of events

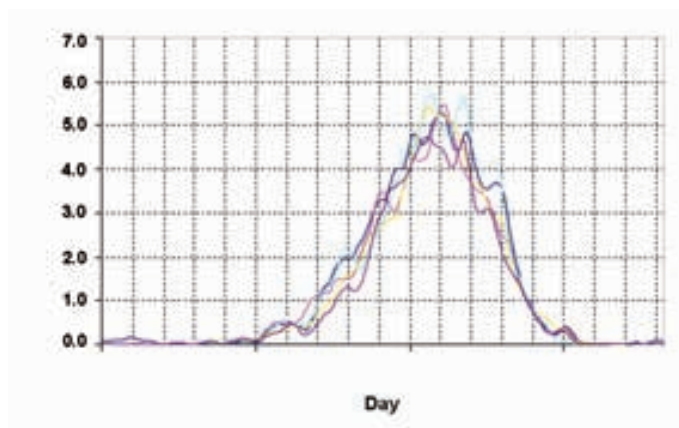


Figure 12 - Bourzanga, Bani, Titao, Tiou-ouahigouya, Pobe, stations (1951-1990) Mean event rainfall distribution

## MEASURE AND MAPPING OF THE HYDROLOGICAL RISK

The type I distribution (or Gumbel) is often used for maximum type events and results from any initial unlimited distribution of exponential type which converges to an exponential function. Kite (1988), Tapsoba (1997). Examples of this type of distribution include the normal and lognormal distributions. The derivation of the type I distribution for a simple exponential function can be described as: Define  $X_{\max}$  as the maximum value of a series of independent variables  $\varepsilon_i$  with cumulative probability distribution given by:  $P(x) = P(\varepsilon_i \leq y)$ :

$$P(X_{\max} \leq y) = P(\varepsilon_1 \leq y, \varepsilon_2 \leq y, \dots, \varepsilon_n \leq y) \quad (11)$$

$$P(X_{\max} \leq y) = [P(y)]^n \quad (12)$$

Assume that the tail of the distribution  $P(y)$  is exponential such that:  $P(y) = 1 - \beta e^{-y}$  (13)

From (12) if  $\ln(\alpha n)$  is a normalizing constant:  $P[X_{\max} \leq y + \ln(\beta n)] = [P(y + \ln(\beta n))]^n$

and from the equation (13):

$$P[X_{\max} \leq y + \ln(\beta n)] = \left(1 - \frac{e^{-y}}{n}\right)^n \quad (14)$$

If  $n \rightarrow \infty$ , then:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[X_{\max} \leq y + \ln(\beta n)] = e^{-e^{-y}} \quad (15)$$

This is a reduced form of the cumulative probability distribution. Let  $y = \beta(x - x_0)$ , where  $\beta$  is a concentration parameter (scale) and  $x_0$  is a measure of central tendency, the cumulative probability of the type I extremal distribution becomes:

$$P(x) = e^{-e^{-\beta(x-x_0)}} \quad (16)$$

According to this procedure, Lebel and Laborde (1988), have demonstrated several applications of the scale parameter of Gumbel distribution. Gutiérrez-López *et al.*, (2002), found that the Gumbel extreme value type I distribution, fits the experimental distribution of the point rainfall monthly maxima well. Similarly, Tapsoba (1997), the number of events registered from  $J_1$  day to  $J_2$  day, follows a Poisson distribution with parameter  $\lambda$  (cumulated number of days among this date). If  $Hx_{j_1-j_2}$  is the maximal annual depth of each event observed every year among day's  $j_1$  and  $j_2$ ,  $P(Hx_{j_1-j_2} \leq Hx)$  can be computed from:

$$P(Hx_{j_1-j_2} \leq Hx) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^i e^{-\lambda}}{i!} \left[1 - e^{\left(\frac{-Hx}{\mu}\right)}\right]^i \quad (17)$$

Moreover, simplifying gives:

$$P(Hx_{j_1-j_2} \leq Hx) = e^{\left[\lambda e^{(-Hx/\mu)}\right]} \quad (18)$$

$$P(Hx_{j_1-j_2} < 0) = 0 \quad (19)$$

That is the Gumbel extreme distribution, for positive values. Alternatively, if the assumptions are made that events are independent and the mean number of events are independent and the mean number of events in unit time is constant then the Binomial and Poisson distributions can be used to evaluate risk. For a Poisson distribution of event occurrences and a extremal type I distribution of events magnitudes, the design events and risk will be function of  $\lambda$  parameter (expected rate of

occurrence of events). Scale parameter of Gumbel distribution fit, for the maximal annual events in the month of August in Tamazula rain gauge station, is at once the same parameter for the daily August rainfall in the Leak distribution. The study of this scale parameter of the Gumbel distribution is used as an index of the extreme rainfall risk. For the Maximal annual data in August (37 years), Gumbel distribution:  $\beta = 13.28$  and  $x_0 = 45.76$  For daily August rainfall Leak distribution:  $\beta = 12.214$  and  $\lambda = 0.654$ .

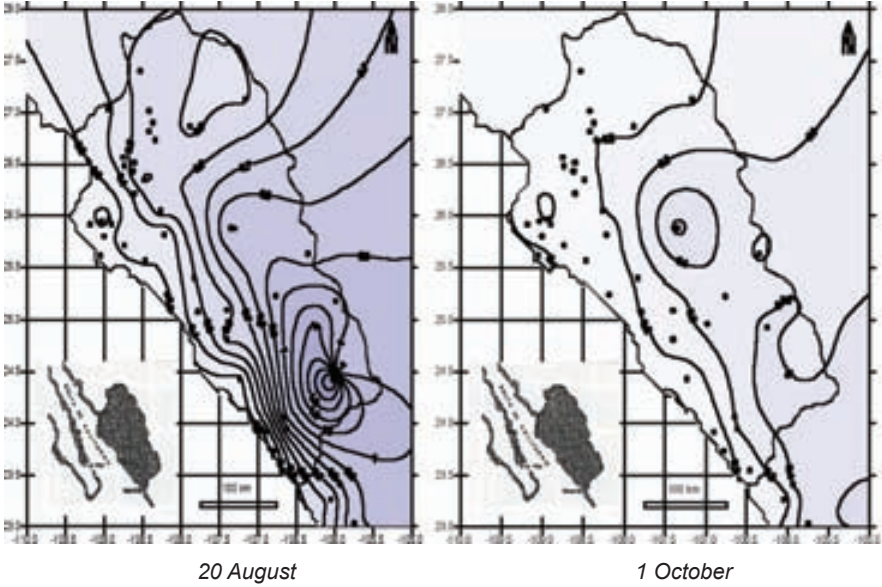


Figure 13 - Spatial - time evolution of mean number of rainy events

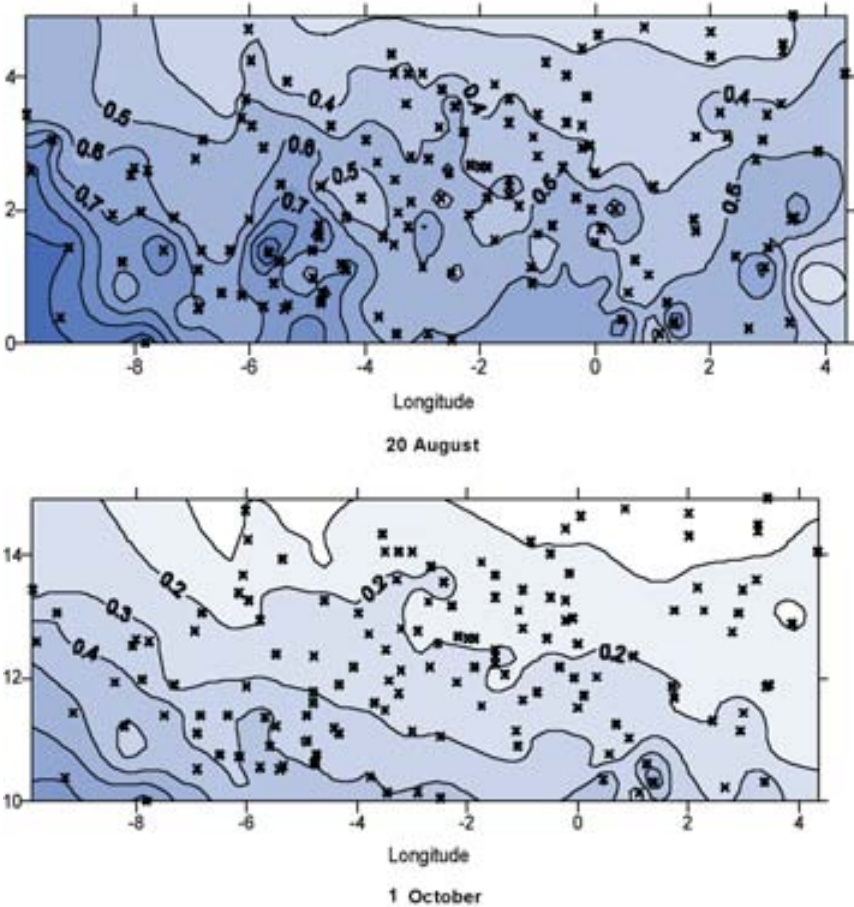


Figure 14 - Spatial - time evolution of mean number of rainy

## CONCLUSIONS

Rainfall in northern Mexico and in Sahel region is a complex phenomenon to study; nevertheless, results of the application of the Leak distribution in this area have allowed a better knowledge of this phenomenon. The Leak distribution has many advantages and allows the decomposition of the rainfall fluctuations into two terms: the fluctuations of the mean event rainfall, and that of the mean number of rainfall events over any period. The coherent set of these parameters leads to find simple relations with its geographic and physical environment. The model is significantly consistent with the description of changes associated with the extreme phenomenon, according to a normal increase of rainfall during the rainy season; on one the main advance, for the Mexican watershed, it is the good knowledge of the hurricane season that gives us the evolution of  $\lambda$ . At the end of September  $\lambda$  shows clearly the decrease and increase of precipitation amount due to the climatic distribution pattern through the hydrological region n°10, and particularly the location of the wettest area, near the coast on the south, and closer to crests on the north (Figures 13 and 14). The mapping of scale to parameter of Gumbel distribution is a suitable tool to explore the information contained into precipitation series. Hydrological region n°10 and Sahel region show a typical behavior of a region affected by extreme phenomena; the main risks appear in the coastal zones and the zone of high rainfall. Finally, it is considered that recommended methodology and the use of the Leak distribution, is adapted to the necessities of estimation of the hydrologic risk and allows a substantial knowledge of the regional climatology. In general Sahel region shows a regular pattern of daily mean number of events  $0.5 \leq \lambda \leq 1.35$ , with a raining season for middle July to end September. In Mexico, appears a shortening rainy season, but with recent increase of daily events.

## REFERENCES

1. BABUZIAUX, C.1969. Etude statistique de la loi des fuites. Service des études et recherches nucléaires, thermiques et hydrauliques, Département Laboratoire National d'Hydraulique, Electricité de France, 119p.
2. GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A., LEBEL, T. and DESCROIX, L. 2002. "Statistical Analysis for Modeling the Hydrological Risk in northern Mexico" International Association for Hydraulic Research (IAHR), Hydraulic and Hydrological Aspects of Reliability and Safety Assessment of Hydraulic Structures St. Petersburg, Russia.
3. GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A., LEBEL, T. and MEJÍA, R. 2005. "Estudio espacio-temporal del régimen pluviométrico en la zona meridional de la república mexicana" *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, IMTA Vol. XX No.1 pp.57-65.
4. KITE, G. W. 1988. "Frequency and risk analyses in hydrology" *Water Resources Publications*, USA, 257p.
5. LE BARBÉ, L. and LEBEL, T. 1997. "Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990" *Journal of Hydrology* 188-189, 43-73.
6. LE BARBÉ, L., LEBEL, T. and TAPSOBA, D. 2002. "Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990". *Journal of Climate*, 15(2) 187-202.
7. LEBEL, T. and LABORDE, J. P. 1988. "A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment" *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 2, 245-261.
8. ONIBON, H. 2001. "Simulation conditionnée des champs de pluie événementiels au Sahel : Application de l'algorithme de Gibbs". Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
9. ONIBON, H., LEBEL, T. and AFOUDA, A. 2002. "Space-time rainfall variability in West Africa derived from observations and GCM's". IAHS Publ. N° 274, pp 483-490.
10. SEGUIS, L.1988. "La pluviométrie au Togo: Caractérisation agronomique", ORSTOM, Centre de L. (Révue interne).

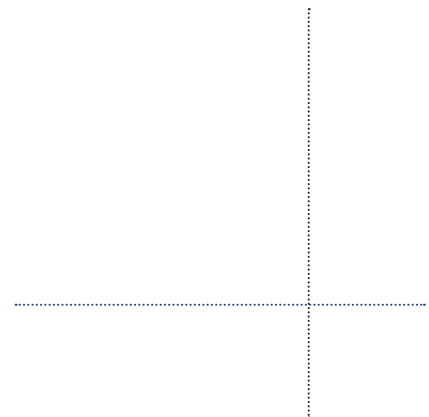
11. TAPSOBA, D. 1993. "Contribution à l'étude des variations spatio-temporelles des précipitation au Burkina Faso à partir du modèle de la loi des fuites". *Mémoire de DEA de l'Université de Paris XI*, Orsay, 88p.
12. TAPSOBA, D. 1997. "Caracterisation événementielle des régimes pluviométriques ouest africains et de leur recent changement" Thesis, *Université de Paris XI*, Orsay, 145p.

## **CAPITULO 3**

### **TENDENCIA, TELECONEXIONES Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA**

## **CHAPTER 3**

### **TENDENCIES, TELECONNECTIONS AND CLIMATE VARIABILITY**





# THE INFLUENCE OF TELECONNECTIONS ON RAINFALL VARIABILITY IN SOUTHWESTERN PUERTO RICO

## LA INFLUENCIA DE TELECONEXIONES EN LA DISPONIBILIDAD DE LLUVIAS EN EL SUDOESTE DE PUERTO RICO

JUAN FELIPE BLANCO  
Institute for Tropical Ecosystems Studies  
University of Puerto Rico  
Rio Piedras Campus  
P.O. Box 21910, San Juan, Puerto Rico 00936-1910  
and Instituto de Biología  
Universidad de Antioquia  
Calle 67 # 53-108  
Medellín, Colombia  
E-mail: blanco@matematicas.udea.edu.co

ARLEEN VERA and JORGE ORTÍZ-ZAYAS  
Institute for Tropical Ecosystems Studies  
and Program of Environmental Sciences  
University of Puerto Rico  
Rio Piedras Campus  
P.O. Box 21910, San Juan,  
Puerto Rico 00936-1910

### ABSTRACT

*We explored the relationship between rainfall variability (1931-2004) from southwestern Puerto Rico (Greater Antilles) to both the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Southern Oscillation (SO). Cross-correlations showed greater values with lags ranging from 1 to >10 years demonstrating weak phase and undefined periodicity. However, NAO and SO index values >1 standard deviation (0.4 and 1.0, respectively) had the strongest effect on rainfall anomaly. Rainfall anomalies tended to be negatively related to NAO index and positively correlated to SO index. A Joint Index, computed as difference between SO and NAO indices, showed a significant coefficient of determination ( $r^2=0.25$ ,  $F_{1, 12}=5.43$ ,  $P<0.01$ ) on rainfall anomalies for a subset of 14 years ( $JI>0.75$ , 1 sd). Positive JI years received 10-40% more rainfall, and negative JI years received 10-30% less rainfall. This result points to a synergistic effect of NAO and SO on controlling interannual variability in rainfall in the Caribbean. We suggest that dry climates such as Southwestern Puerto Rico may better reflect teleconnections due to a reduced role of topographic and maritime controls on local hydrology.*

**Key words:** Puerto Rico; Caribbean; rainfall; interannual variability; Southern Oscillation; North Atlantic Oscillation

### INTRODUCTION

Understanding the causes of interannual variation of rainfall in dry areas of the Caribbean is necessary to manage social, economic, and ecological problems derived from temporary water deficit (Larsen 2000). However, few local studies have explored those causes. Traditionally, the North Atlantic



Oscillation (NAO) has been attributed as a main control of rainfall variability in the northern Caribbean. For instance, rainfall is negatively correlated to the NAO index in Puerto Rico and the Virgin Islands (Rogers 1988, Malmgrem *et al.* 1998). In contrast, the Southern Oscillation (SO) is regarded as a weak to moderate influence on northern Caribbean climate (Rogers 1988, Malmgrem *et al.* 1998). Recent studies, however, suggest that the SO may have a significant influence on the region by positively interacting with the NAO (Giannini *et al.* 2001). Particularly, summer dryness associated to negative SO phase adds to the dryness associated to positive NAO phase during previous winter thus reducing regional rainfall. In addition, during spring the wetness derived from positive SO phase adds to the wetness associated to negative winter NAO phase. These constructive coincidences peaked over the past 20 years and may explain greater frequency of dry summers in the Caribbean during the warm SO phase (Giannini *et al.* 2001). Separately, SO exerts a greater influence than NAO on sea surface temperature (SST) in the Caribbean, but greater variation is explained when both indices are combined into a single model (Giannini *et al.* 2001). This significant relationship between SO index and the SST has been previously reported for Puerto Rico, but influence on rainfall over the island was not found (Malmgrem *et al.* 1998). This lack of influence may result from computational problems or scale-dependent processes because a positive relationship between SO index and rainfall is known at the regional scale (Giannini *et al.* 2001). The objective of this paper is to relate rainfall variability in the dry forest of Guánica (Southwestern Puerto Rico) with SO and NAO teleconnections by using several methods.

## DATA

Rainfall time series (1931-2004) were obtained from the following three stations administered by the US National Atmospheric and Oceanographic Administration (NOAA) and located close to the Guánica Commonwealth dry forest (southwestern Puerto Rico, Greater Antilles, Lugo *et al.* 1996): Ensenada (station code: 663532; 17.58 N, 66.56 W), Santa Rita (668955; 18.01 N, 66.53 W), and Central San Francisco (662316; 17.59 N, 66.49 W). We verified for these stations to belong to a single climatic region by using a Non-metric Multidimensional Scaling and a Multiple Permutation Response Procedure (PC-Ord Software) on average monthly rainfall. Afterwards, monthly rainfall was averaged among stations throughout the entire series to obtain a single regional value. Total annual rainfall was computed for every record year. An annual rainfall anomaly index was derived by subtracting the overall mean (815 mm) from observed annual precipitation, and a rainfall deviation was computed dividing observed by mean values. NAO and SO indices were obtained for the study period from NOAA web site ([www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc)).

## METHODS

Firstly, rainfall anomaly time series was cross-correlated independently with SO and NAO indices series to test the strength of local influence of teleconnections and to check occurrence of time-lagged responses. Rainfall anomaly was also compared between years experiencing SO index greater than 1 standard deviation (1.0) using the Mann-Whitney test (Molles and Dahm 1990, Greenland 1994). Positive and negative above this limit relate to the occurrence of La Niña and El Niño, respectively. This procedure was repeated for years experiencing NAO index greater than 1 standard deviation (0.4) because they may exert the strongest effects on temperature and rainfall in the Caribbean (Hurrell 1995).

Since SO and NAO affect the Caribbean climate in opposite directions, we computed a Joint Index (JI) as follows:

$$JI = SOI - NAOI$$

NAO index subtracted from SO index to optimize for synergistic effects. JI was plotted against NAO and SO to explore its spectrum variation as a function of both influences. Standardized SO and NAO indices were also plotted.

Rainfall anomaly was regressed against JI. Since a great variability in rainfall anomalies were observed in the JI mid domain ( $\pm 1 \text{ sd}=0.75$ ) this segment was excluded from the regression model.

## RESULTS

Peak to peak correlation was weak between rainfall anomaly and either SO or NAO index because oscillations were not in phase and lacked a defined period (Figure 1). The greatest positive cross-correlations ( $>0.24$ ) were observed with time lags  $>4$  years.

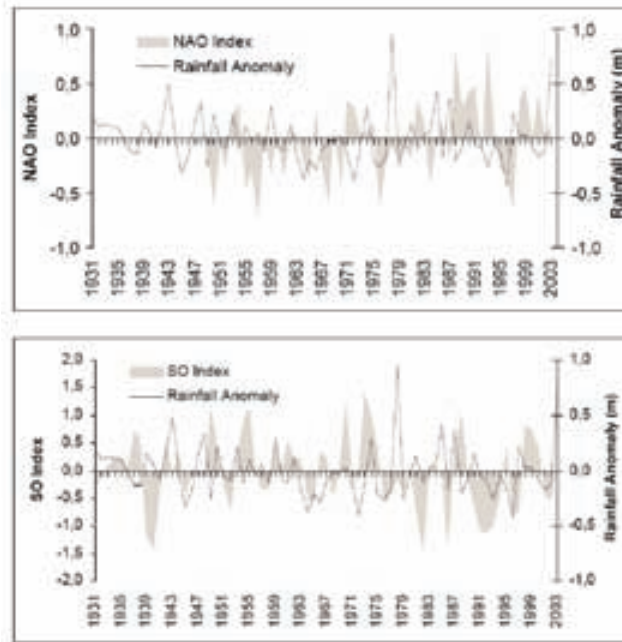


Figure 1 - Regionalized time series of rainfall anomalies (m) in Southwestern Puerto Rico relative to North Atlantic Oscillation (upper panel) and Southern Oscillation (lower panel).

Table 1 - Mann-Whitney (U) tests comparing rainfall anomalies (mean $\pm$ SE) among time periods relative to SO and NAO index. Probabilities are indicated among parenthesis in the last column.

Record period	SO or NAO	Rainfall anomaly (mm)	U(P)
1931 - 2004	SO > 0.5	SO < -0.5	96 (0.23)
	$8.65 \pm 45.3n = 15$	$-86.6 \pm 44.8n = 17$	
	SO > 1	SO < -1	19 (0.48)
	$10.6 \pm 76.7n = 7$	$-69.7 \pm 51.5n = 7$	
1951 - 2004	SO > 0.5	SO < -0.5	44 (0.086)
	$25.5 \pm 52.4n = 15$	$-111.3 \pm 47.6n = 10$	
	SO > 1	SO < -1	6 (0.17)
	$23.1 \pm 83.8n = 5$	$-137 \pm 36.6n = 5$	
	NAO > 0.4	NAO < -0.4	
	$-84.4 \pm 64.1n = 6$	$-11.7 \pm 49.9n = 8$	15 (0.24)

Negative cross-correlations ( $<-0.15$ ) were observed with 1, 2 and 6 years time lags.

Positive NAO years tended to experience negative anomalies while negative NAO years experienced positive anomalies (mean  $\pm$  SE:  $-84.4 \pm 64.1$  and  $11.7 \pm 49.9$ , respectively; Mann-Whitney test,  $n_1 = 6$ ,  $n_2 = 8$ ,  $U = 15$ ,  $P = 0.24$ , Table 1). Positive SO years tended to experience positive anomalies while negative SO years experienced negative anomalies (mean  $\pm$  SE:  $8.65 \pm 45.3$  and  $-86.6 \pm 44.8$ , respectively; Mann-Whitney test,  $n_1 = 15$ ,  $n_2 = 17$ ,  $U = 96$ ,  $P = 0.23$ ). In both cases, trends were marginally significant. Nonetheless, greater differences in rainfall anomalies were observed between 1951 and 2004 in relation to El Niño and La Niña conditions (Table 1, Figure 1).

Values of Joint Index linearly increased along the rightwards 1:1 diagonal in the SO vs NAO bi-plot (Figure 2). The normal to this diagonal represented the  $JI=0$  isocline. Negative JI values laid above this isocline, and positive values laid below. Quadrats with positive JI values were driven by large positive SO index values ( $>1$ , La Niña conditions). Negative JI quadrats were characterized either by large negative SO index values ( $>-1$ , El Niño conditions) or by positive NAO index value coinciding with weak El Niño conditions ( $<-0.5$ ). JI was normally distributed (mean $\pm$ sd:  $0.75\pm 0.75$ , Figure 2) because both SO and NAO values tend to be normal ( $-0.05\pm 0.66$  and  $-0.03\pm 0.35$ , respectively).

Rainfall anomaly was positively correlated with JI (Figure 3). The determination index ( $r^2$ ) was small, but significant ( $r^2=0.03$ ,  $F 1, 52=2.62$ ,  $P<0.05$ ) when the 54 years of record were included. However, it increased significantly ( $r^2=0.25$ ,  $F 1, 12=5.43$ ,  $P<0.01$ ) when the 14 years with  $JI>0.75$  (1 sd) were only included. Positive JI exhibited annual rainfall anomalies greater than 100 mm, while negative values exhibited negative anomalies greater than 100 mm. It means that positive JI years received 10-40% more rainfall while negative JI years received 10-30% less rainfall. Positive (wet) JI conditions occurred between 1950 and 1974 while negative (dry) JI conditions occurred between 1982 and 2001 (Table 2). Rainfall anomalies departures from the general trend occurred in several years. Contrary to the expected, positive anomalies were observed in 1990, and negative anomalies in 1961 and 1973 (Figure 3).

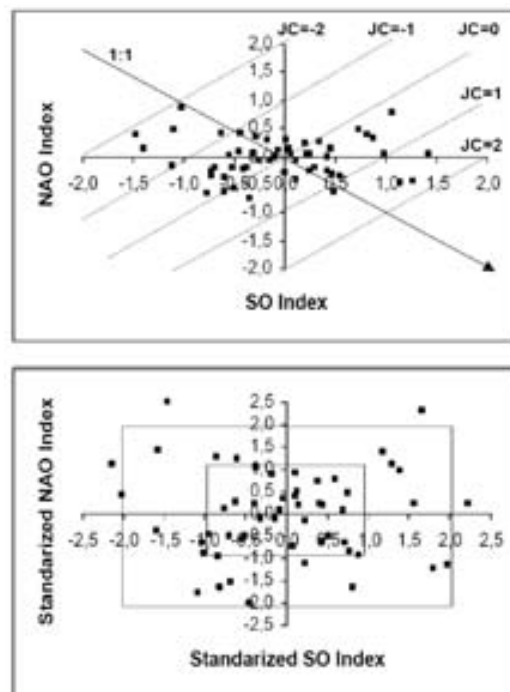


Figure 2 - Upper panel: Bi-plot showing NAO and SO index values for record years. The arrow depicts a 1:1 relationship between values, and dotted lines Joint Index (JI) isoclines. Lower panel: Bi-plot showing standardized NAO and SO index values. Small and large boxes represent 1 and 2 standard deviations.

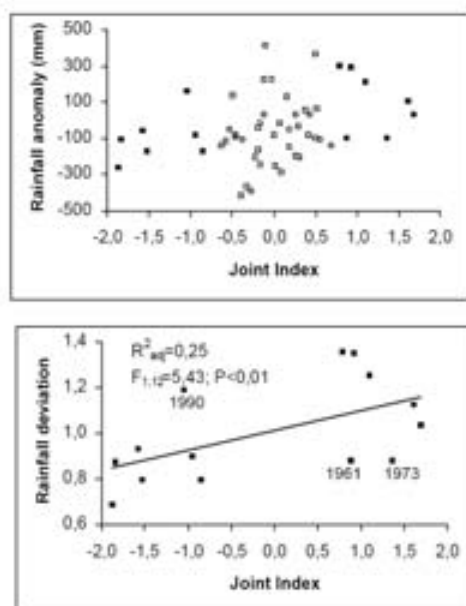


Figure 3 - Upper panel: Scatter plot between Joint Index and rainfall anomalies Open dots were not included in Regression Analyses. Lower panel: Relationship between Joint Index and rainfall deviation (significance test is included). Years with largest mean squares are indicated.

Table 2 - Years and rainfall anomalies relative to Joint Index (JI) values. Only JI values greater than 1 sd (0.75) were included.

Year	JI	Rainfall anomaly (mm)		Year	JI	Rainfall anomaly (mm)	
		Positive	Negative			Positive	Negative
1950	1,11	207		1982	-1,84		-106
1955	1,62	100		1986	-1,52		-172
1959	0,79	295		1990	-1,04	156	
1961	0,89		-102	1991	-1,57		-59
1970	1,70	25		1992	-0,94		-85
1973	1,37		-101	1993	-1,87		-263
1974	0,93	289		2001	-0,85		-171

## DISCUSSION

Our results suggest that NAO and SO together explain a significant proportion in interannual rainfall variability in the dry landscape of Southwestern Puerto Rico. This study confirmed the negative relationship between the NAO and rainfall previously reported (Rogers 1988, Malmgren *et al.* 1998). However, the positive relationship observed between SO and rainfall, particularly during the second half of the 20<sup>th</sup> century, contradicts the findings by Malmgren *et al.* (1998) for Puerto Rico, and support the general trend reported for the Caribbean (Rogers 1988, Giannini *et al.* 2001). Malmgren's study, however, observed air and sea surface temperatures increased or decreased closely related to El Niño and La Niña conditions, respectively. Weak correspondence between SO and rainfall in small islands such as Puerto Rico may be due to the interacting topographic and maritime forces affecting the region (Colón 1983, Scatena 1995, García-Martinó *et al.* 1996a,b). In the absence of

high relief, increased air temperature increases evaporation over land, and wet and warm winds from the ocean cannot be intercepted promoting negative rainfall anomalies during negative SO years (El Niño). Conversely, interception of wet air masses by high relief may compensate increased overland evaporation during negative SO. For these reasons, dry climate promoted by both rain shadow and low relief in southern Puerto Rico may be more responsive to SO than the northern area. Actually, surface water deficit is more frequent in the South than in the North (Larsen 2000). In last, watershed aspect may be another topographic modulator of teleconnections on local rainfall and streamflow (García-Martinó *et al.* 1996b).

In addition to topography, both local- and regional-scale meteorology may restrict teleconnections (NAO and SO) on Caribbean climate to extreme conditions. Indeed, large SO events (>1 sd) produce greater rainfall anomalies particularly during constructive interactions with NAO (Giannini *et al.* 2001). In our study, positive JI, wet condition, was driven by La Niña, and negative JI, dry condition, was driven either by strong El Niño or positive NAO (during average SO years) in Southern Puerto Rico. The greater variability in rainfall during medial NAO or SO years could be related to interannual variability and dominance of forcing factors such as extratropical cold fronts, tropical hurricanes, sea surface temperature, and strength of trade winds. It is known that rainfall in Puerto Rico is directly related to the first three factors and inversely to the last (Scatena 1995).

The analyzed rainfall record from Southwestern Puerto Rico reflects the non stationary condition of regional climate which may account for different time-scales of operation of both NAO and SO (Giannini *et al.* 2001). Positive JI between 1950 and 1974 relate to prevailing La Niña conditions and negative NAO. Oppositely, negative JI between 1982 and 2001 relate to El Niño conditions. Previous studies report that NAO has shifted from values prior to the 1970's to positive values in recent years (Hurrell 1995). In addition, the ten strongest El Niño have been recorded over the last 30 years, and the top 3 during the 1990's decade (Greenland 1994, Larsen 2000).

In conclusion, NAO and SO teleconnections on Southern Puerto Rico rainfall may be evident under extreme and constructive conditions. The proposed Joint Index captures such synergy and was significantly correlated with rainfall anomaly dynamics. Prevailing importance of SO and NAO is seemingly non stationary. Teleconnection strength seems to be magnified in the area by smooth relief and rain shadows. These are important for both designing conservation strategies of endangered species and integrated management of water resources.

Acknowledgement. The authors thank Miguel Canals and Carlos Conde for providing information and discussions. This paper reports partial results from the project "Hydrological assessment of the habitats of the endangered Crested Toad in Guánica, Puerto Rico" funded by the American Association of Zoos and Aquaria and the University of Puerto Rico, Río Piedras. Members of the Puerto Rican Crested Toad Research and Management Expert Group also contributed with ideas and discussions. Arleen Vera was funded by a Research Experiences for Undergraduates Fellowship from "Louis Stokes Alliance for Minority Participation, Puerto Rico".

## REFERENCES

1. COLÓN, J. A. 1983. Algunos aspectos de la climatología de Puerto Rico. *Acta Científica* 1, 55-63.
2. GARCÍA-MARTINÓ, A., WARNER, G. S., SCATENA, F. N. & CIVCO, D. L. 1996(a). Rainfall, runoff and elevation relationships in Luquillo mountains, Puerto Rico. *Caribb. J. Sci.* 32, 413-424.
3. GARCÍA-MARTINÓ, A., SCATENA, F. N., WARNER, G. S. & CIVCO, D. L. 1996 (b). Statistical low flow estimation using GIS analysis in humid mountain regions of Puerto Rico. *Wat. Res. Bull.* 32, 1259-1271.

4. GIANNINI, A., CANE, M. A., & KUSHNIR, Y. 2001. Interdecadal changes in the ENSO teleconnection of the Caribbean Region and the North Atlantic Oscillation, *J. Climate* 4, 2867-2879.
5. GREENLAND, D. 1994. *El Niño and long-term ecological research (LTER) sites*. Publication No. 18. LTER.
6. HURRELL, J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science* 269, 676-679.
7. LARSEN, M. C. 2000. Analysis of 20<sup>th</sup> century rainfall and stream flow to characterize drought and water resources in Puerto Rico, *Phys. Geogr.* 6, 494-521.
8. LUGO, A. E., RAMOS, O., MOLINA, S., SCATENA, F. N., & VÉLEZ, L. L. 1996. A fifty-three year record of land use change in the Guánica Forest Biosphere Reserve and its vicinity. USFS Technical report.
9. MALMGREN, B., WINTER, A. & A., CHEN, D. 1998. El Niño Southern Oscillation control of climate in Puerto Rico, *J. Climate* 11, 2713-2717.
10. MOLLES, M. C., JR. & DAHM, C. N. 1990. A perspective on El Niño and La Niña: Global implications for stream ecology. *J. North Amer. Benthological Soc.* 9, 68-76.
11. ROGERS, J. C. 1988. Precipitation variability over the Caribbean and tropical Americas associated with the Southern Oscillation. *J. Climate* 1, 172-182.
12. SCATENA, F. N. 1995. Relative scales of time and effectiveness of watershed processes in a Tropical mountain rainforest of Puerto Rico. *Geophysical Mono.* 98, 103-111.

# CONTENIDO INTEGRAL DE VAPOR DE AGUA EN LA ZONA TROPICAL ENTRE 17° Y 25° LATITUD NORTE Y 66° Y 97° LONGITUD OESTE

## INTEGRAL WATER VAPOUR CONTENTS IN THE TROPICAL ZONE BETWEEN 17° AND 25° NORTH AND 66° AND 97° WEST

ALFREDO ROQUE RODRÍGUEZ  
DULCE O. PÉREZ BETANCOURT  
IBIS RIVERO LLERENA  
LETICIA MUÑIZ PARADELA  
REINALDO BÁEZ ALTAMIRANO

Instituto de Meteorología  
Loma de Casablanca  
Municipio Regla  
Ciudad de La Habana, CP 11700. AP 17031  
Cuba  
E-mail: alfredo.roque@insmet.cu

### RESUMEN

*El presente trabajo tuvo como objetivo principal el estudio del contenido integral de vapor de agua en una región del trópico cercana a Cuba, posterior al año 1995, mediante el procesamiento de la información aerológica proveniente de los radiosondeos realizados en algunas estaciones del trópico norte, zona que como se sabe por resultados de diversos autores, ha tenido el incremento más significativo del vapor de agua en los últimos años. El resultado permite apreciar que si bien no se observa un aumento en el contenido integral de vapor de agua en el bienio 1998-99, tampoco se observa una disminución notable de este parámetro. El análisis de los 2 años por separados mostró que los valores del contenido integral de vapor de agua fueron superiores a los del año 1999, principalmente para la estación Cayo Hueso, quizás atribuido a la influencia sobre el área de estudio del evento ENOS en el primer semestre del año 1998.*

**Palabras clave:** vapor de agua

### INTRODUCCIÓN

El último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de 1995 (IPCC), permitió ver la inmensa mayoría de los elementos que son necesarios para estudiar y analizar las diversas aristas que constituye este fenómeno.

Entre los distintos temas tratados con el fin de llamar la atención sobre los mismos está el concerniente al estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y su repercusión sobre el clima. Precisamente estas emisiones, las cuales se han incrementado ostensiblemente durante el siglo XX, están ejerciendo su influencia sobre la temperatura de la tierra, provocando un aumento de la misma, la cual repercute negativamente sobre el clima.

Uno de los problemas que acarrea este aumento es el de incrementar sustancialmente la evaporación y por tanto el vapor de agua en la atmósfera, el gas de efecto invernadero más fuerte que existe, esto a su vez amplifica dicho efecto, incrementando más aún la temperatura, provocando una retroalimentación o feedback positivo.

El IPCC de 1995 aborda esta temática basándose fundamentalmente en los resultados más significativos encontrados hasta ese momento por la comunidad científica, entre los que se encuentran los de Elliot *et al.* 1995.

Entre los principales resultados mostrados en el Informe del IPCC del año 1995 acerca de esta temática se encuentra el hecho de que incrementos en la evaporación han venido acompañados de incrementos en la temperatura y viceversa para gran parte del planeta, pero fundamentalmente en los trópicos, donde se encontraron las estaciones con tendencia positiva de este incremento con mayor significación estadística.

El resultado más significativo al respecto sobre esta temática es el trabajo de Ross y Elliott (1996) y en el que se detallan como principales resultados el incremento de más de 2mm/década del agua precipitable o lo que es lo mismo de 0.2 g/cm<sup>2</sup>/década de vapor de agua para el área del Caribe disminuyendo a valores muy próximos a cero en las medias y altas latitudes septentrionales.

Aunque todavía no se puede afirmar con seguridad lo que significará el cambio climático en forma detallada, existe un amplio consenso entre los principales científicos especialistas sobre el clima, en cuanto a la probable serie de consecuencias de los cambios climáticos mundiales y regionales, entre los que se encuentran la elevación de la temperatura media global entre 1° C y 3.5 ° C para el año 2100, la elevación del nivel del mar y un aumento de los fenómenos meteorológicos extremos (IPCC, 1995).

Por tanto resulta imprescindible continuar profundizando en el análisis sobre las causas y efectos que sobre el clima están ejerciendo las actividades humanas.

Uno de los pasos fundamentales, que sigue al respecto es el monitoreo de todas las emisiones de gases de efecto invernadero, su repercusión en la temperatura media de la tierra y de esta sobre la evaporación, cuyas consecuencias debido a su aumento ya fueron explicadas al inicio de la introducción.

El último estudio publicado sobre esta temática, del cual tengan noticias los autores, es, además del ya mencionado trabajo de Ross y Elliott (1996) el realizado entre los años 1988-1994 por el Proyecto NASA y que se dio a conocer también en el año 1996 (NAVP, 1996).

Por tanto este trabajo tiene como objetivos: Estudiar el comportamiento del vapor de agua en una zona del trópico cercana a Cuba y en un período posterior al año 1995, comparando los resultados con los históricos encontrados por otros autores para la misma región y con los hallados para la provincia de Camagüey (Roque *et al.*, 1998).

A pesar de contar con sólo 2 años de datos, estos tuvieron características singulares desde el punto de vista climático para el área que nos proponemos estudiar, y particularmente para Cuba.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Como se dijo en la introducción la información utilizada para este trabajo se extrajo del sitio web [www.raob.fsl.noaa.gov](http://www.raob.fsl.noaa.gov), perteneciente al National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). De allí se extrajeron los sondeos aerológicos correspondientes a las estaciones del área 72201, 78526, 78397 y 76692, correspondientes a las regiones de La Florida (Cayo Hueso), Puerto Rico (San Juan), Jamaica (Kingston) y México (Veracruz). La Figura 1, muestra la posición geográfica de cada una de ellas y la zona de estudio, mientras la Tabla 1, además de las coordenadas de cada estación muestra también los meses utilizados en el análisis (señalados con \*).

Los meses faltantes en las estaciones 78397 y 76692, eran o porque no tenían datos correspondientes a algún año o porque los sondeos fueron rechazados por el chequeo realizado al no contar con los requisitos necesarios. Un mes era considerado válido si tenía al menos 10 días con observación y no más de 5 días consecutivos sin que hubiera observación (Ross y Elliot, 1996). Un sondeo



era considerado válido si tenía al menos datos de temperatura, humedad y presión de los niveles mandatorios y significativos hasta los 500 hPa.

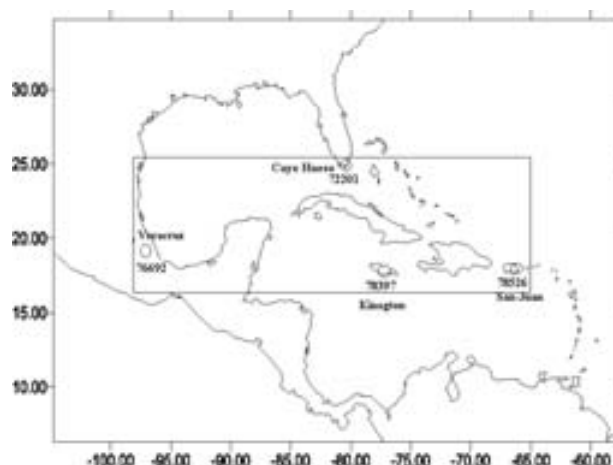


Figura 1 - Ubicación de las estaciones utilizadas en el estudio: Cayo Hueso (72201), San Juan (78526), Kingston (78397) y Veracruz (76692). El rectángulo encierra la zona de estudio.

Tabla 1 - Posición geográfica de las estaciones utilizadas y meses utilizados en el Informe

Estación	Latitud	Longitud	HSNM (mts)	E	F	M	A	Y	J	L	G	S	O	N	D
72201	22.55	-81.75	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
78526	18.43	-66.00	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
78397	17.93	-76.78	4	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	
76692	19.17	-96.12	13	*	*	*	*	*	*			*	*	*	*

### Cálculo del contenido integral de vapor de agua o de agua precipitable (w).

El principal parámetro para el cálculo de w en este trabajo fue la humedad específica q, expresada en g/kg, calculada para las diferentes superficies isobáricas seleccionadas, por lo que la relación entre w y q viene expresada por la relación,

$$w = \frac{1}{g} \int_{P_0}^{P_n} q dp \quad (1)$$

Donde:

P<sub>0</sub>- presión en superficie

P<sub>n</sub>- presión final del límite superior de las n capas seleccionadas.

g- aceleración de la gravedad, tomada como 9,8 m/s<sup>2</sup>.

q- humedad específica media de las capas seleccionadas.

w- se expresa en g/cm<sup>2</sup>

Cuya integración asume un comportamiento lineal de q entre dos niveles (i,i+1) de presión. En la práctica w se calcula

$$w = \frac{1}{g} \left[ \frac{(q_i + q_{i+1})}{2} \right] (P_i - P_{i+1}) \quad (2)$$

La información fue agrupada en los periodos noviembre-abril y mayo-octubre, para facilitar su comparación con los resultados obtenidos para Camagüey y con los obtenidos por Ross y Elliott.

## COMPORTAMIENTO ESTACIONAL DEL VAPOR DE AGUA EN LA ZONA DE ESTUDIO.

La Tabla 2 (a-d) muestra los valores medios del Contenido de Integral de Vapor de Agua para las estaciones analizadas, cuyos valores mínimos se encuentran en el periodo noviembre - abril, mientras que los valores máximos se encuentran en el periodo mayo - octubre. La oscilación anual de este parámetro es similar a la encontrada para Camagüey (Roque *et al.*, 1998), como se muestra en la Figura 2.

Tabla 2 - Valor medio del Contenido Integral de Vapor de Agua a las 1200 GMT durante el periodo 1998-1999 en las estaciones:

### a) Cayo Hueso (201)

Sondeos procesados	50	59	52	48	54	47	56	50	54	60	45	53
$w_{med}$	3.23	2.94	3.01	2.83	2.68	2.98	3.67	4.43	4.71	5.13	5.01	4.14
DS	0.95	0.93	0.89	0.75	0.71	0.71	1.08	0.58	0.63	0.49	0.78	1.07
$w_{med}^{período}$	2.95						4.52					
$w_{med}^{anual}$	3.73											

### b) San Juan (526)

Sondeos procesados	55	60	57	51	58	56	61	57	59	59	58	62
$w_{med}$	4.53	3.90	3.67	3.37	3.71	4.06	4.46	4.70	4.71	4.83	4.84	5.0
DS	0.73	0.98	0.64	0.56	0.54	0.70	0.56	0.51	0.55	0.56	0.53	0.69
$w_{med}^{período}$	3.87						4.64					
$w_{med}^{anual}$	4.26											

### c) Jamaica (397)

Sondeos procesados	33		46	41	37		40	50	34	30	34	42
$w_{med}$	4.42		3.80	3.27	3.88		4.41	4.54	4.52	4.75	5.37	5.29
DS	1.12		0.62	0.67	0.58		0.79	0.65	0.64	0.62	0.80	0.67
$w_{med}^{período}$	3.84						4.81					
$w_{med}^{anual}$	4.32											

### d) Veracruz (692)

Sondeos procesados	40	37	43	34	49	39	39	45			47	40
$w_{med}$	3.56	3.22	3.11	2.60	3.16	3.54	3.60	4.88			5.48	4.60
DS	1.01	0.65	0.60	0.57	0.64	0.68	0.70	0.78			0.83	1.89
$w_{med}^{período}$	3.20						4.64					
$w_{med}^{anual}$	3.92											

En el valor para los periodos noviembre-abril y mayo-octubre y el anual mostrado en las Tablas para las estaciones Kingston (397) y Veracruz (692), debe tenerse en cuenta que algunos meses presentan ausencia de datos que sin duda alguna afectarían el valor reportado, sobre todo para la estación de Veracruz, cuyos meses faltantes, julio y agosto constituyen meses de elevado contenido

de humedad para nuestra región. En Camagüey (Roque, 1998) el valor histórico durante el período noviembre-abril fue 3.77 g/cm<sup>2</sup>, mientras que en el período mayo-octubre fue de 4.83 g/cm<sup>2</sup>, para un valor anual de 4.30 g/cm<sup>2</sup>, valores similares a los encontrados en el período analizado para la estación de San Juan.

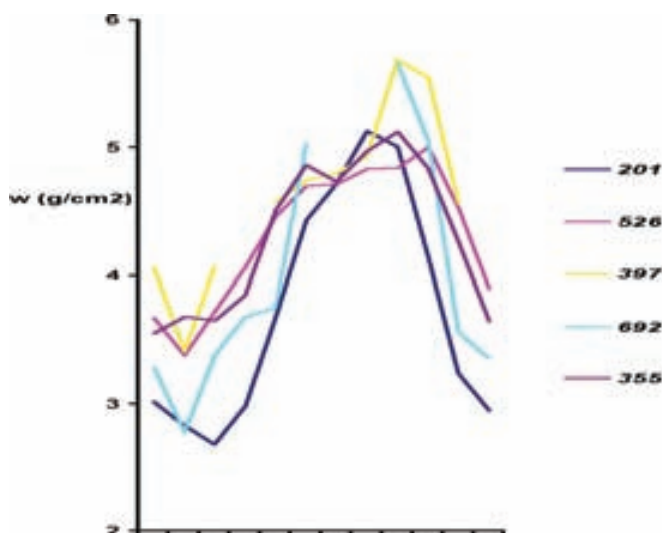


Figura 2 - Oscilación anual del contenido integral de vapor de agua para las estaciones: Cayo Hueso (201), San Juan (526), Kingston (397) y Veracruz (692). Período 1998-99 y Camagüey (355) para el período 1981-1995. 1200 GMT.

Al comparar los resultados obtenidos con los históricos (RE) encontrados por Ross y Elliott (1996 a), se presentan algunas diferencias especialmente en las estaciones de Cayo Hueso y Veracruz (Tabla 3)

Tabla 3 - Valores anuales del contenido integral de vapor de agua en la zona de estudio durante los años 1998-1999 y su correspondiente valor histórico a las 1200 GMT

Estación	1998	1999	Promedio 98/99	RE (Histórico)
201	3.83	3.61	3.73	3.54
526	4.33	4.2	4.26	4.30
397	4.37	4.29	4.32	4.32
692	4.16	3.76	3.92	4.26

Mientras que las estaciones San Juan y Kingston tuvieron valores similares a los históricos, Cayo Hueso estuvo por encima de su media histórica con 0.23 g/cm<sup>2</sup>, valor apreciable si se toma en cuenta que está en el orden de la razón de incremento del vapor de agua por década encontrados por Ross y Elliott (1996 a) y que es de 0.2 g/cm<sup>2</sup>. Igualmente para Veracruz, si bien es cierto que los meses faltantes deberían elevar más su valor anual, este no debe sobrepasar su valor histórico, para el período analizado, lo que haría que esta estación conjuntamente con Kingston, estuvieran por debajo de su media histórica.

Al comparar los valores anuales por separado, es decir 1998 y 1999, estos presentaron como característica principal, que en el año 1998, los valores fueran superiores a los reportados para el año 1999 en todas las estaciones y estos fueron superiores o del mismo orden con respecto a su media histórica, quizás vinculado a los últimos efectos durante el primer semestre de 1998 del evento ENOS. Sin embargo, a pesar de ser un año, con suficiente humedad en la atmósfera, se

presentó una sequía severa entre marzo y abril de ese mismo año 1998, lo cual refuerza la hipótesis de la ausencia de los mecanismos generadores de lluvias en las precipitaciones, aspectos estos que fueron tratados por Lapinel, 1999.

Resulta llamativo también el hecho de que la estación de Cayo Hueso en el año 1999 su promedio anual estuvo también por encima de su media histórica, no siendo así para las demás estaciones, aunque principalmente para la estación de Veracruz, la cual presentó una disminución de alrededor de 0.3 g/cm<sup>2</sup>, quizás también vinculado al evento AENOS presente durante ese año.

Al igual que para Camagüey los valores mínimos medios del contenido integral del vapor de agua para las distintas estaciones se alcanzan entre los meses de enero - marzo y dada la posición geográfica de ellos, los valores para la zona de estudio disminuyen hacia la zona del Golfo de México.

La oscilación anual presentó a partir de abril un incremento sostenido que alcanzó su máxima amplitud en los meses de verano, provocando que la zona de estudio se encontrase bajo la influencia de una intensa humedad con respecto al período noviembre - abril, con valores medios del contenido de vapor de agua por encima de 4,5 g/cm<sup>2</sup> e incluso en algunos meses por encima de 5 g/cm<sup>2</sup>, valores que solo son superados por los que se alcanzan en la zona tropical del Océano Pacífico (NAV, 1996).

#### ***Distribución vertical de w durante el período 98 - 99.***

La distribución vertical de este parámetro para las estaciones analizadas se muestra en la Tabla 4 (a - d). En ella se observa que el ciclo anual encontrado en toda la columna se manifiesta aquí también, con los valores más altos alrededor de los meses de verano.

Puede apreciarse que en la capa Sup - 850 hPa, para todas las estaciones se encuentra más del 50% de w, lo cual implica que la mayor absorción de radiación infrarroja por toda la columna se produce en esta capa. Las cantidades de w por encima de los 500 hPa es una característica típica de la zona tropical.

Para facilitar la comparación con los resultados alcanzados por Ross y Elliott y los hallados para el área de estudio, la distribución vertical se concentró en 3 capas: Sup - 850 hPa, 850 - 700 hPa, y 700 - 500 hPa.

La Figura 3 muestra de manera integral los resultados alcanzados tanto por Ross y Elliott (RE) y los de la zona de estudio para el período 1998 - 1999. En ellos se muestra la gran correspondencia alcanzada entre los valores de las diferentes muestras.

En Camagüey los resultados fueron 2.04, 1.18 y 0.75 g/cm<sup>2</sup> para las capas Sup-850, 850-700 y 700-500 hPa, respectivamente, los que como se aprecian están en correspondencia con los resultados anteriores.

Por último se calculó qué porcentaje de w existente en las capas 850-500, 850-700 y 700-500 hPa, se encuentra contenido en la capa Sup-500 hPa. Los resultados se muestran en la Tabla 5 a-c.

En la misma se aprecia que entre el 55 - 60 % del contenido de vapor de agua de la capa Sup-500 hPa se encuentra entre Sup - 850 hPa, entre el 25 - 29 % en la capa 850-700 hPa y alrededor del 15% en la capa 700-500 hPa.

Tabla 4 - Distribución vertical del contenido integral de vapor de agua (w) en las estaciones.  
Período 1998-99. 1200 GMT.

a) Cayo Hueso (201)

Est. 201	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sup-950	0.84	0.78	0.79	0.91	1.07	1.21	1.25	1.24	1.18	1.09	0.95	0.91
950-900	0.50	0.48	0.45	0.54	0.60	0.71	0.74	0.79	0.77	0.67	0.57	0.52
900-850	0.38	0.37	0.34	0.38	0.45	0.53	0.55	0.62	0.61	0.53	0.43	0.38
850-800	0.33	0.34	0.27	0.29	0.39	0.48	0.51	0.58	0.57	0.49	0.38	0.34
800-750	0.24	0.23	0.22	0.22	0.28	0.37	0.39	0.44	0.42	0.36	0.27	0.22
750-700	0.18	0.17	0.14	0.15	0.20	0.28	0.28	0.34	0.32	0.26	0.17	0.14
700-600	0.27	0.25	0.23	0.25	0.33	0.46	0.48	0.56	0.53	0.38	0.24	0.22
600-500	0.14	0.10	0.12	0.12	0.18	0.30	0.26	0.30	0.31	0.19	0.10	0.11
500-400	0.08	0.07	0.07	0.07	0.11	0.18	0.16	0.17	0.19	0.11	0.07	0.06
400-300	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.07	0.07	0.09	0.05	0.04	0.03
300-200	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
200-100	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

b) San Juan (526)

Est. 526	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sup-950	1.02	0.94	1.0	1.04	1.14	1.23	1.24	1.23	1.20	1.18	1.08	1.03
950-900	0.66	0.60	0.63	0.69	0.71	0.76	0.76	0.80	0.79	0.79	0.74	0.67
900-850	0.50	0.48	0.49	0.54	0.56	0.59	0.62	0.63	0.60	0.61	0.59	0.54
850-800	0.46	0.42	0.44	0.48	0.53	0.53	0.56	0.58	0.57	0.58	0.56	0.49
800-750	0.29	0.25	0.29	0.34	0.38	0.37	0.38	0.41	0.42	0.45	0.40	0.39
750-700	0.19	0.16	0.21	0.26	0.27	0.30	0.29	0.30	0.33	0.34	0.32	0.22
700-600	0.28	0.25	0.32	0.37	0.43	0.48	0.44	0.47	0.50	0.53	0.47	0.32
600-500	0.12	0.12	0.15	0.16	0.22	0.26	0.23	0.23	0.26	0.29	0.23	0.13
500-400	0.07	0.07	0.09	0.10	0.13	0.14	0.12	0.12	0.14	0.16	0.12	0.08
400-300	0.03	0.03	0.05	0.04	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.04
300-200	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
200-100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

c) Kingsnton (397)

Est. 397	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sup-950	1.0	0.91	1.01		1.05	1.08	1.10	1.13	1.13	1.13	1.04	
950-900	0.65	0.60	0.68		0.72	0.74	0.74	0.76	0.77	0.78	0.70	
900-850	0.54	0.48	0.53		0.58	0.60	0.61	0.60	0.64	0.65	0.58	
850-800	0.50	0.43	0.48		0.54	0.56	0.57	0.58	0.62	0.63	0.55	
800-750	0.35	0.28	0.36		0.39	0.36	0.28	0.42	0.43	0.42	0.39	
750-700	0.24	0.17	0.25		0.28	0.29	0.26	0.29	0.37	0.38	0.30	
700-600	0.31	0.23	0.33		0.45	0.47	0.47	0.51	0.67	0.68	0.50	
600-500	0.10	0.09	0.13		0.20	0.24	0.24	0.24	0.37	0.32	0.21	
500-400	0.06	0.05	0.07		0.12	0.13	0.16	0.14	0.25	0.20	0.10	
400-300	0.04	0.02	0.03		0.06	0.06	0.07	0.06	0.10	0.08	0.04	
300-200	0.01	0.01	0.01		0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	
200-100	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	

d) Veracruz (692)

Est. 692	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sup-950	0.83	0.77	0.87	0.92	1.03	1.13			1.02	0.94	0.90	0.84
950-900	0.54	0.49	0.56	0.60	0.63	0.75			0.73	0.61	0.54	0.50
900-850	0.42	0.41	0.46	0.50	0.51	0.61			0.63	0.54	0.45	0.42
850-800	0.37	0.33	0.41	0.41	0.47	0.59			0.61	0.52	0.41	0.38
800-750	0.27	0.20	0.21	0.29	0.28	0.44			0.50	0.39	0.29	0.27
750-700	0.22	0.11	0.18	0.21	0.18	0.34			0.41	0.35	0.24	0.23
700-600	0.29	0.18	0.29	0.37	0.28	0.54			0.72	0.57	0.37	0.37
600-500	0.07	0.05	0.10	0.15	0.13	0.26			0.44	0.34	0.20	0.22
500-400	0.05	0.03	0.05	0.06	0.05	0.15			0.27	0.22	0.11	0.06
400-300	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05			0.11	0.09	0.04	0.02
300-200	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02			0.04	0.04	0.01	0.01
200-100	0.01	0	0	0	0	0			0	0	0	0

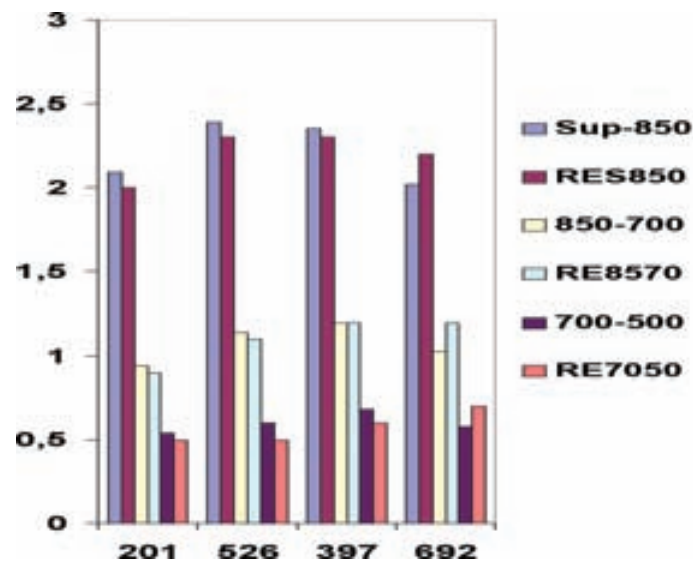


Figura 3 - Comparación entre los valores anuales de  $w$  obtenidos en la zona de estudio durante el bienio 1998-1999 y los históricos alcanzados por Ross y Elliott (RE) para las capas: Sup-850, 850-700 y 700-500 hPa a las 1200 GMT.

De igual manera, la comparación con los resultados hallados por Ross y Elliott (RE) y los encontrados para Camagüey, demuestran bastante similitud, lo que nos lleva a concluir, que los valores medios del contenido integral del vapor de agua durante el período 98 - 99, para la zona de estudio, no se diferenciaron mucho de sus correspondientes valores medios históricos, calculados a partir del año 1973. Esto significa que, si bien no se observa una disminución del vapor de agua en la zona de estudio, tampoco se observa un incremento notable del mismo en el período analizado, aunque en el mismo trabajo de Ross y Elliott, a pesar de que se demostró una tendencia positiva hacia el incremento del vapor de agua en las estaciones del trópico, esto fue solo de 2mm /década, es decir 0.2 cm<sup>2</sup>/década, lo cual hace que cualquier incremento o disminución pueda quedar oculto por la escala de tiempo con que se realizó este trabajo.

Tabla 5 - Porcentaje de vapor de agua (w) contenido en las capas:,  
y con respecto a la capa Sup-500 hPa. RE, valores históricos.

a) Sup-850 hPa

% de w en la capa Sup – 850 con respecto a la capa Sup – 500 hpa														
Est.	E	F	M	A	Y	J	L	G	S	O	N	D	A	RE
201	59.7	59.9	61.7	64.0	60.6	56.5	57.0	54.4	54.4	57.7	63.0	63.7	59.4	59
526	61.9	62.7	60.1	58.5	56.8	57.1	58.0	57.2	55.4	54.1	54.9	60.2	58.1	59
397	59.3	62.4	58.9	-	56.0	56.0	57.4	55.0	51.0	51.3	54.3	56.6	56.2	58
692	59.5	66.0	61.4	59.0	61.8	53.4	-	-	47.0	49.1	55.6	58.1	56.4	54
355													52	

b) 850-700 hPa

% de w en la capa 850 – 700 con respecto a la capa Sup- 500 hPa														
Est.	E	F	M	A	Y	J	L	G	S	O	N	D	A	RE
201	26.0	27.2	24.6	23.1	24.9	26.0	26.5	28.0	27.8	28.0	26.4	24.7	26.1	26
526	26.7	25.8	26.6	27.8	27.8	26.5	27.2	27.7	28.3	28.7	29.2	28.0	27.5	27
397	29.5	27.6	29.0	-	28.7	28.0	26.0	28.5	28.4	28.7	28.3	-	28.4	28
692	28.6	25.2	25.9	26.4	26.5	29.4	-	-	30.0	29.6	27.6	29.0	27.9	29
355													29	

c) 700-500 hPa

% de w en la capa 700 – 500 hPa con respecto a la capa Sup- 500 hPa														
Est.	E	F	M	A	Y	J	L	G	S	O	N	D	A	RE
201	14.2	12.9	13.7	12.9	14.6	17.5	16.6	17.7	17.8	14.4	10.9	11.6	14.6	15
526	11.4	11.5	13.3	13.7	15.3	16.4	14.8	15.0	16.3	17.2	15.9	11.8	14.4	13
397	11.1	10.3	12.2	-	15.4	16.4	16.2	16.6	20.8	20.0	16.6	-	15.0	14
692	12.0	9.0	12.7	15.1	11.7	17.2	-	-	22.9	21.4	16.7	12.9	15.0	17
355													18	

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de la información aerológica de las estaciones: Cayo Hueso, San Juan, Kingston y Veracruz en el bienio 1998-1999, para el estudio del vapor de agua arrojó las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Los valores del contenido integral de vapor de agua en la región de estudio permitieron inferir, que para nuestro país, los valores aproximados estuvieron entre 3.5 y 4 g/cm<sup>2</sup> para el período noviembre - abril y entre 4.5 y 5 g/cm<sup>2</sup> para el período mayo – octubre durante el bienio 1998-1999.

2. El incremento del vapor de agua en toda la columna en el año 1998 con respecto al año 1999 en todas las estaciones advirtió la posibilidad de que estuviese influenciado por los últimos efectos del evento ENOS, como también lo habían hecho Ross y Elliott.
3. La distribución vertical de w mostró que entre sup-850 hPa se encuentra entre el 55-60 % del contenido integral de vapor de agua existente en la capa sup-500 hPa, entre el 25-29 % se encuentra en la capa 850-700 hPa y alrededor del 15 % en la capa 700-500 hPa. Estos valores no se diferencian notablemente de los valores históricos encontrados por Ross y Elliott para la zona de estudio y tampoco con los encontrados para Camagüey.

## REFERENCIAS

1. ELLIOTT, W. P., R. J. ROSS and D. J. GAFFEN, 1995. Water vapor trends over North America. Sixth Symposium on Global Change Studies, Amer. Meteor. Soc., Preprints, pp 185-186.
2. IPCC. 1995. Climate Change. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of Intergovernmental. Panel on Climate Change. Cambridge, University Press.
3. LAPINEL, B. 1999. Caracterización de factores circulatorios, hídricos y energéticos asociados al comportamiento anómalo del régimen de las lluvias en Cuba. Informe Científico Técnico. INSMET. mayo 1999.
4. NAVP. 1996. A New Global Water Vapor Dataset. Bulletin of de AMS (BAMS), june, vol. 77, No. 6, NASA WATER VAPOR PROJECT.
5. ROQUE, A., PÉREZ, D., ROMÁN, L. E., BÁEZ, R. 1998. Análisis del Contenido Integral de Vapor de Agua sobre Camagüey. Importancia para los estudios del Cambio Climático. Informe científico – técnico. CFA. INSMET.
6. ROSS, R. J., ELLIOTT, W. P. 1996 (a). Tropospheric precipitable water: A Radiosonde-Based Climatology. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-219.
7. ROSS, R. J., ELLIOTT, W. P. 1996 (b). Tropospheric water vapor climatology and trends over North America: 1973-93. Reprinted from Journal of Climate, vol. 9, No. 12, December 1996. Amer. Meteor. Soc.



# DÍAS CON TORMENTAS EN LA PROVINCIA DE CIEGO DE ÁVILA. ELEMENTOS SINÓPTICOS PARA SU PREDICCIÓN

## STORM DAYS IN THE CIEGO DE ÁVILA PROVINCE. SINOPTIC ELEMENTS FOR ITS FORECAST

ORLANDO LÁZARO CÓRDOVA GARCÍA  
Centro Meteorológico Provincial  
Ciego de Ávila  
E-mail: cordova@meteo.fica.inf.cu

### RESUMEN

*En este trabajo se muestra el comportamiento anual, mensual y decenal de los días con tormentas en la provincia de Ciego de Ávila y en las distintas áreas geográficas en que quedó dividida por el desigual comportamiento espacial de la referida variable meteorológica, profundizándose en los estudios de los cayos del norte de la provincia, por ser la primera vez que se investiga este fenómeno en esa porción del archipiélago cubano, obteniéndose que los meses con mayor presencia de este fenómeno son agosto y septiembre, siendo la tercera decena de agosto con las dos primeras de septiembre cuando existe el pico máximo de esta variable.*

*Con el fin de obtener elementos que ayuden a su mejor predicción, se muestra la relación existente, entre los días con tormentas y los patrones sinópticos bajo los cuales se desarrollan en los meses de agosto y septiembre. Los resultados demostraron que el patrón sinóptico que se representa con mayor frecuencia es el asociado a la influencia extendida del anticiclón subtropical. Esta investigación permite conocer las particularidades de los días con tormentas eléctricas bajo cada uno de los patrones sinópticos en cada zona del territorio estudiado y por tanto permite elevar la calidad y efectividad de los pronósticos de esta variable para la provincia de Ciego de Ávila, facilitando de esta forma mitigar los daños que pueda producir este fenómeno, tanto a la sociedad, como a la economía.*

**Palabras clave:** Día con tormentas, Tormenta

### INTRODUCCIÓN

Las tormentas son uno de los procesos meteorológicos más comunes en el área tropical en general y en Cuba en particular. Ellas representan uno de los mayores peligros para la vida humana y la economía. Las tormentas se caracterizan por la ocurrencia de descargas eléctricas múltiples, llegando a ser frecuentemente muy fuertes y de manera continua en un período de tiempo determinado.

Desde la antigüedad el hombre primitivo temía a los fenómenos atmosféricos y los relacionaba con advertencias y castigos de los dioses, o bien los interpretaba como signos de mala suerte o anuncios de futuros eventos. Zeus, mitológico dios griego del cielo y de la tierra, iba armado con el trueno y el rayo, y al agitar su escudo producía las tempestades y los huracanes, y como consecuencia, todos aquellos lugares que habían sido tocados por un rayo eran considerados sagrados por los hombres de la antigüedad

En la actualidad el tema es aún, de por sí, lo suficientemente fascinante como para justificar y motivar la curiosidad científica, pero existen también razones prácticas, ya que se trata de un fenómeno sumamente peligroso que ocasiona, año tras año, considerables pérdidas humanas y materiales.

A partir de mediados de la década de los sesenta del siglo pasado, las descargas eléctricas constituyen la principal causa de muerte por fenómenos meteorológicos en Cuba. El número de víctimas fatales se eleva a un promedio de 66 por año, sin que se disponga de información sobre el número de heridos (Alfonso, 1994).

Alfonso (1992) en su trabajo “Descargas eléctricas en Cuba. Aspectos meteorológicos” plantea que la distribución de muertes por fulguración se corresponde casi exactamente con las de las tormentas eléctricas, ocurriendo el 97.5 % de los casos en la época lluviosa del año (mayo-octubre), período en que son más numerosas las tormentas eléctricas.

En Cuba el nivel y el desarrollo científico-técnico alcanzado en los años de Revolución han contribuido a profundizar sobre los fenómenos que ocurren en la atmósfera y su incidencia en el comportamiento de diferentes elementos meteorológicos en superficie. Esto ha logrado que se hayan realizado múltiples trabajos investigativos de especialistas del sistema meteorológico nacional, tanto climático, como sinóptico, que explican el comportamiento de las diferentes variables meteorológicas en el área geográfica en donde se encuentra ubicada Cuba.

La salvaguarda de vidas humanas, bienes económicos y la protección del medio ambiente es la premisa fundamental de la vigilancia meteorológica en nuestro país. Para lograr tales propósitos es necesario incentivar la investigación científica en los sistemas de pronósticos provinciales, como parte integrante del servicio nacional de vigilancia meteorológica. Esto es uno de los mayores pilares en el trabajo meteorológico de Cuba, por su relación directa, día tras día, con las personas y la economía.

Para una comprensión adecuada de esta investigación se hace necesario definir algunos elementos, según la terminología usada oficialmente por el Instituto de Meteorología (INSMET), como son:

**Día con tormentas:** “día en que se oye una tormenta en una estación de observación”. OMM (1992).

**Tormenta:** “descarga brusca de electricidad atmosférica que se manifiesta por un resplandor breve (**relámpago**) y por un ruido seco o estruendo sordo (**trueno**). Las tormentas se asocian a **nubes convectivas** (cumulonimbus) y suelen acompañarse de precipitaciones en forma de chubascos de lluvias o de hielo o, en ocasiones, nieve, nieve granulada, hielo granulado o granizo”.

La temática abordada en el presente trabajo tiene una gran actualidad e importancia y sus resultados permiten elevar la calidad y eficiencia de los pronósticos del tiempo, logrando mitigar los efectos negativos que puedan originar las tormentas a la sociedad y la economía.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto el presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Conocer el comportamiento en la provincia de Ciego de Ávila, del elemento meteorológico “día con tormenta” tanto espacial como temporalmente, profundizando en las particularidades sobre Cayo Coco, lo cual se analiza por primera vez para los grupos insulares del archipiélago cubano.
- Obtener elementos sinópticos que ayuden a mejorar la predicción de esta variable en el territorio provincial en los meses de mayor afectación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Debido al desigual comportamiento en la provincia de Ciego de Ávila de los días con tormentas y tomando en consideración las condiciones físicas-geográficas del entorno se dividió a la provincia en cuatro zonas.

Este estudio abarca, no sólo, los períodos de alta y baja frecuencia de la variable y los meses del período lluvioso, sino que también se analiza el fenómeno detalladamente en las decenas de cada

mes, con un estudio completo en Cayo Coco, lo cual se realiza por primera vez en Cuba, de ahí su novedad científica y aplicación práctica para el pronóstico de este fenómeno meteorológico.

Se utilizaron los datos de 10 años (1990-1999) de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas del INSMET, que se encuentran ubicadas en la provincia Ciego de Ávila, las cuales son representativas para las zonas en que quedó dividida la provincia, distribuidas de la siguiente forma: Costa Sur en el poblado de Júcaro (78345), Centro-Sur en el central azucarero "Venezuela" (78346), Norte poblado de Fallas (78347) y Cayería Norte, ubicada en Cayo Coco (78339).

En el análisis de la variable "día con tormenta" se tuvo en cuenta que la toma de los datos fue realizada con el personal capacitado y el instrumental recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y asentados en la Tabla de Fenómenos, cumpliendo con las normas técnicas estipuladas, así como el procesamiento con la metodología aprobada por el INSMET para la red de estaciones, tomándose como un punto aislado de observación y no como una red.

En la segunda parte de este trabajo se relacionan los días con tormentas con los patrones sinópticos bajo los cuales suceden, con el fin de obtener elementos sinópticos que contribuyan a su mejor pronóstico en los meses de mayor afectación a la provincia: agosto y septiembre. Para lograrlo se tomó una muestra de 503 casos con días con tormentas y 107 días sin la presencia del fenómeno, para un total de 610 días analizados, correspondiente a los meses de agosto y septiembre (los de mayor presencia del fenómeno), de los años 1990 hasta el 1999. Para estudiar la relación entre los procesos sinópticos y el comportamiento de los días con tormentas, se compararon los casos con los análogos o patrones sinópticos obtenidos por Pazos (1998) para el período lluvioso del año.

## **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **a) *Comportamiento de los días con tormentas en la provincia Ciego de Ávila.***

La marcha mensual de los días con tormentas en la provincia de Ciego de Ávila (Figura 1) muestra que los meses en que mayores números de días se presentan son, en primer orden septiembre, con una media de 18.6 días, seguido por agosto 17.6 y julio con 15.8 días. Por el contrario en los meses con menor frecuencia son diciembre con sólo una media de 0.5 días, febrero con 1.1 y enero con 1.5 días con tormentas. Todo lo anterior debe estar relacionado a que en los meses del período lluvioso la masa de aire es más húmeda e inestable que en los meses del período poco lluvioso, cuando se imponen anticiclones de origen continental con masas de aire más secas, estables y con gradiente horizontal de presión más fuertes, los cuales no favorecen el efecto que produce en la formación de la nubosidad convectiva la circulación de la brisa. Sin descartar que asociados a los frentes fríos y líneas pre - frontales se dan tormentas en este período. De esta manera se presentan dos estaciones bien marcadas de esta variable en la provincia, una de mayor afectación que comprende desde finales de mayo a comienzo de octubre y otra de menos incidencia que es desde la segunda mitad de octubre hasta comienzo de mayo (Figura 2).

El análisis del comportamiento decenal de las tormentas, realizado por primera vez en este territorio, mostró que la mayor frecuencia ocurre en la tercera decena de agosto, con tormentas 7 días, seguida por la primera y la segunda de septiembre con 6 de estos días. Por lo que al año existe un pico de ocurrencia de días con tormentas entre la última decena de agosto y las dos primeras de septiembre, como puede verse en la figura 2. Lo contrario ocurre en diciembre en donde en la segunda y tercera decena sólo ocurre como promedio, un día con tormenta en la provincia cada 10 años.

En cuanto a la hora de comienzo de las tormentas eléctricas ocurren por lo general en la tarde, entre las 13:00 y 19:00 hora local en el interior del territorio avileño. En la cayería por sus costeras, ocurren tormentas en horas de la madrugada en proporciones mayores que para el resto de la provincia, situaciones estas que profundizaremos más adelante.

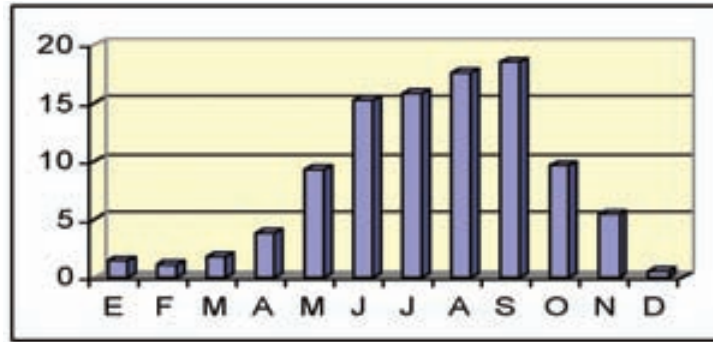


Figura 1 - Marcha mensual de los días con tormentas en la provincia de Ciego de Ávila. Período 1990-1999.

Tabla 1 - Media mensual de días con tormentas para la provincia de Ciego de Ávila.

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1.5	1.1	1.8	3.9	9.3	15.2	15.8	17.6	18.6	9.7	2.5	0.5

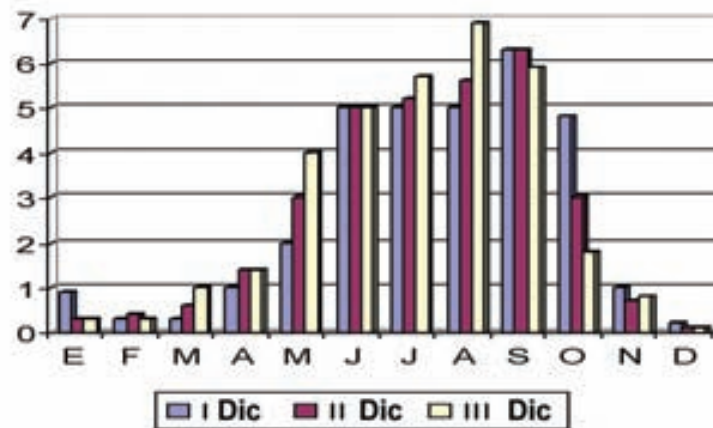


Figura 2 - Medias decenales de días con tormentas en la provincia de Ciego de Ávila. Período 1990-1999.

**b) Comportamiento de los días con tormentas por zonas en la provincia de Ciego de Ávila.**

En este epígrafe analiza la manifestación de este fenómeno en cada una de las cuatro zonas en que quedó dividida la provincia para el presente estudio, profundizando en el horario de comienzo de las tormentas y en su duración en la cayería Norte (Cayo Coco), por ser primera vez que se estudia este elemento en esa zona.

En la provincia de Ciego de Ávila ocurren como promedio entre las diferentes zonas, un total de 98 días con tormentas al año, distribuidas de la siguiente forma: 83 días con tormenta en la cayería Norte, 92 días en la zona Norte, 104 hacia el Centro – Sur y 112 en la costa Sur (Figura 3), lo que puede ser producto de que hacia la mitad Sur de la provincia es donde se localiza con mayor frecuencia la línea de confluencia del flujo a mesoescala y por tanto el levantamiento convectivo en horas de la tarde, la formación y desarrollo de nubes que originan tormentas eléctricas.

En especial en la cayería norte, el promedio histórico de días con tormentas es de 83 días, el más bajo en todo el territorio provincial. El mes de mayor afectación de tormentas eléctricas es septiembre con una media mensual de 15.9 días con tormenta, seguido por junio con 13.3 y agosto con 13.1 días (Figura 4). Dentro de los meses las decenas que más se destacan son la primera de

septiembre con 5.6 días con tormentas, la tercera de agosto con 5.5 y la segunda, nuevamente del noveno mes del año con 5.3 (Figura 5).

Los meses de menor afectación de esta variable para esta zona son diciembre con sólo 0.5 días con esta variable (5 días con tormentas en 10 años), seguido por febrero con 1,4 días con tormentas (Figura 4). Entre las decenas de menor afectación están las tres decenas de diciembre, donde en la primera y segunda ocurren solo 2 tormentas cada 10 años (0.2 días con tormentas promedio) y la tercera en donde se registra únicamente un día con tormenta en todo un período de 10 años (Figura 5).

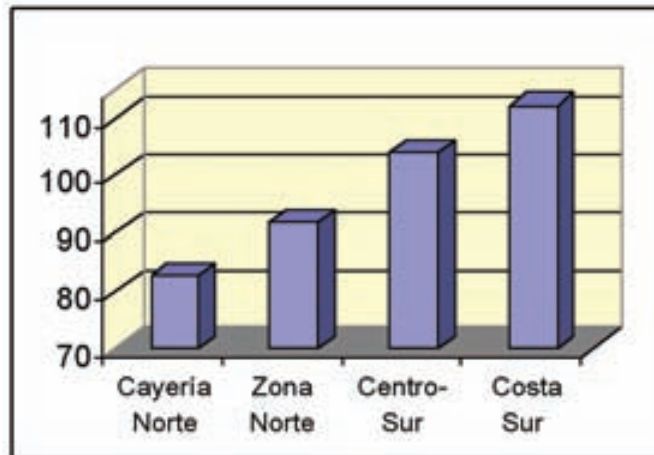


Figura 3 - Comportamiento anual de días con tormentas por zonas en la provincia de Ciego de Ávila. Período 1990-1999.

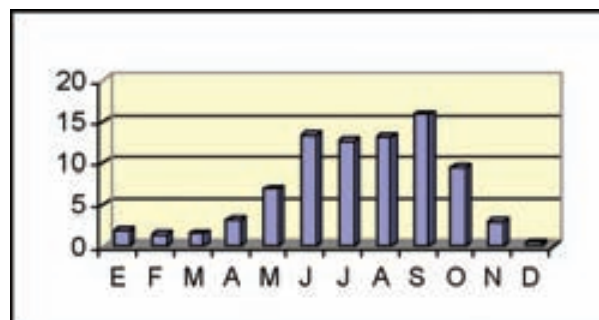


Figura 4 - Días con tormentas por meses en la cayería Norte de la provincia Ciego de Ávila. Período 1990-1999.

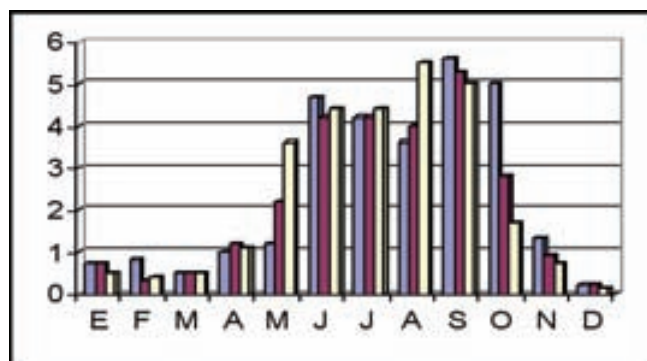


Figura 5 - Media decenal de días con tormentas en la cayería Norte de la provincia de Ciego de Ávila. Período 1990-1999.

Además, en la cayería norte la hora de comienzo de las tormentas difiere en algo con lo reportado en estudios realizados por Gancedo (1981) para el interior de la Isla de Cuba, quienes plantearon que las horas más probables de formación de las tormentas están comprendidas entre las 13:00 y las 20:00 horas local, lo que se manifiesta también para las zonas del interior de la provincia de Ciego de Ávila, como veremos en epígrafe 3.3.3. En la cayería Norte de Ciego de Ávila se observa que hay un porcentaje alto de tormentas que comienzan en horas de la madrugada y la mañana, con un 14.8 % entre las 01:00 y las 04:00 hora local y otro 18.4 % entre las 10:00 y las 13:00 hora local .

En esta zona, en lo que se refiere al lapso de tiempo que duran las tormentas, se encontró que predominan las que duran menos de una hora con un 57.5 % como promedio en el año, correspondiéndose con lo obtenido por Gancedo (1981) para zonas del interior de Cuba.

**c) Análisis sinóptico de la ocurrencia de días con tormentas en la provincia Ciego de Ávila en el bimestre agosto-septiembre.**

Como se mostró en los epígrafes anteriores, los meses de mayor presencia en Ciego de Ávila del fenómeno estudiado son agosto y septiembre, por tanto en este epígrafe analizaremos los días con tormentas en la provincia en estos meses y su relación con los patrones sinópticos o análogos obtenidos por Pazos (1998) para el período lluvioso del año. Este trabajo puede constituir una herramienta más a la hora de pronosticar con mayor certeza este elemento meteorológico en el bimestre de mayor afectación.

En los meses de agosto y septiembre el análogo que más se presenta en los días con tormentas, en cualquier zona de la provincia, es el Análogo E (35.4 %) y el de menor frecuencia el F con solo 1.2 %. Como un caso aparte trataremos los días con tormentas que ocurren bajo la presencia de Organismos Ciclónicos Tropicales (O.C.T), que estén sobre la provincia o que se encuentren en sus inmediaciones, por tanto del total de días con tormentas en la provincia el 2.3 % ocurren bajo esta situación sinóptica (Tabla 2).

*Tabla 2 - Distribución de los días con tormentas en la provincia de Ciego de Ávila para cada uno de los Análogos de Pazos (1998) en el bimestre agosto-septiembre (N es igual al número de casos).*

Análogos	A	B	C	D	E	F	O.C.T	Total
%	17.5	17.5	16.4	9.4	35.4	1.2	2.3	100
N	88	88	82	47	178	6	14	503

La distribución de los días con tormentas por zonas, con cada uno de los Análogos, (Tabla 3), muestra la misma proporción obtenida para toda la provincia: el Análogo E predomina por encima de los restantes, quedando también el F en menor proporción, incluso superado por los días con tormentas originados por los O.C.T.

La distribución del número de días promedio con tormenta para el total de la provincia con relación a los Análogos, muestra que el Análogo E está presente en 8.9 días con tormentas, dentro de los 25.1 que como promedio existen con este fenómeno en cada mes del bimestre, seguido por los Análogos A y B con 4.4 días respectivamente. El de menor frecuencia es el Análogo F con sólo 0.3 (Tabla 4).

En la Tabla 5 se muestra el comportamiento de los días con tormentas, en el total de los días del bimestre, en cada zona, bajo la presencia de los patrones sinópticos que caracterizan a los Análogos. Esto se puede considerar como un pronóstico de ocurrencia de días con tormentas, para cada una de las zonas, bajo las condiciones que representan cada uno de los Análogos. Es interesante ver que para todos los Análogos el mayor porcentaje de ocurrencia de días con tormentas corresponde a la zona de la costa Sur, situación que se ha reiterado en el presente trabajo y confirmada por los datos reales, pues es en esa zona, donde mayor cantidad de días con tormentas ocurren en todo el año.

Tabla 3 - Distribución de los días con tormentas con relación a los Análogos de Pazos (1998) por zonas en el bimestre agosto-septiembre.

Zonas	Cayería Norte		Norte		Centro-Sur		Costa Sur	
Análogos	%	N	%	N	%	N	%	N
A	23.0	61	23.0	64	18.7	69	17.3	70
B	16.0	44	17.0	49	15.5	57	16.0	65
C	17.0	49	17.4	51	17.4	64	16.0	65
D	10.0	29	8.6	25	8.8	32	9.6	39
E	30.0	83	30.6	92	36.1	133	36.8	149
F	1.0	4	0.7	2	0.8	3	1.5	6

Tabla 4 - Distribución del número de días con tormentas con relación a los Análogos en el bimestre agosto-septiembre en la provincia Ciego de Ávila.

Análogos	A	B	C	D	E	F	O.C.T	Total
Números de días	4.4	4.4	4.1	2.4	8.9	0.3	0.6	25.1

También resalta el hecho que cuando está presente el Análogo F, la probabilidad de ocurrencia de días con tormentas es elevado para la costa Sur, debido a que los gradientes de presión más fuertes dados en este análogo, provocan que la zona de confluencia del flujo a mesoescala (y por tanto las tormentas), se origine prácticamente sobre la línea de costa o sobre las aguas cercanas del Golfo de Ana María. Le sigue en importancia la cayería Norte, lo que induce a pensar que bajo este patrón sinóptico en la costa Norte, es responsable de que aparezca un fuerte reforzamiento de los vientos de región Nordeste entre las 07:00 y 10:00 hora local y en ocasiones en horas más tempranas, que producen con frecuencia chubascos de corta duración en zonas de la cayería y costa Norte de la provincia. Entre los cayos y la costa Norte se forma una fuerte zona de convergencia superficial, asociada a la parte delantera del frente de brisa, (Pazos, 1998).

En la Tabla 5, hay que destacar, que el Análogo A es el que mayor tendencia tiene a producir días con tormentas en cualquier zona de la provincia, a pesar de no ser el dominante en la serie, o sea, cuando se espere que esté presente este Análogo, hay que predecir una alta probabilidad de ocurrencia de tormenta para todas las zonas de la provincia de Ciego de Ávila.

Tabla 5 - Distribución (en porcentaje) de ocurrencia de días con tormentas en cada zona, con relación a los Análogos para el bimestre agosto-septiembre. Período 1990-1999.

Análogos	Cayería Norte	Zona Norte	Zona Centro-Sur	Costa Sur
A	65	68	73	74
B	46	52	60	68
C	54	57	71	72
D	51	44	56	68
E	40	44	64	72
F	57	29	43	86

Desde marzo de 1995, los Centros Meteorológicos Provinciales (CMP) reciben diariamente una versión del pronóstico del (ECMWF) Centro Europeo de Pronóstico de Plazo Medio para el área de trabajo que incluye a Cuba, parte del Golfo de México, las Bahamas, parte del Mar Caribe y de la América Central; área que coincide prácticamente con las cartas de los “Análogos”, lo que posibilita que con los nuevos Software de la familia “CubaForecast” confeccionados por el CMP de Cienfuegos y puestos en práctica de forma operativa en el resto de los CMP y en el Centro de Pronóstico del INSMET, sea posible determinar el valor de presión en cada uno de los 6 nodos de la rejilla que rodea a Cuba y que son los utilizados para obtener los parámetros  $\gamma$  y  $\beta$  definidos por Pazos (1998). A partir de su evaluación, sería posible conocer el tipo de Análogo esperado para los plazos de 48, 72, 96, 120, 144 y 168 horas de pronóstico, pudiéndose obtener de antemano una predicción de los días con tormentas para cualquier zona en la que quedó dividida la provincia de Ciego de Ávila.

Un ejemplo de esto lo mostramos a continuación: se escogió al azar, de la salida del “CubaForecast”, un pronóstico de 48 horas de un día dentro del período lluvioso, en este caso el 27 de junio de 2003, el cual resultó ser del tipo E (Figura 6). Ese día ocurrió tormenta en las zonas centro-sur y costa sur de la provincia, las cuales son las que tienen mayores porcentajes de probabilidades de ocurrencia de este fenómeno (64 % y 72 % respectivamente), como ya vimos anteriormente en la tabla 5.

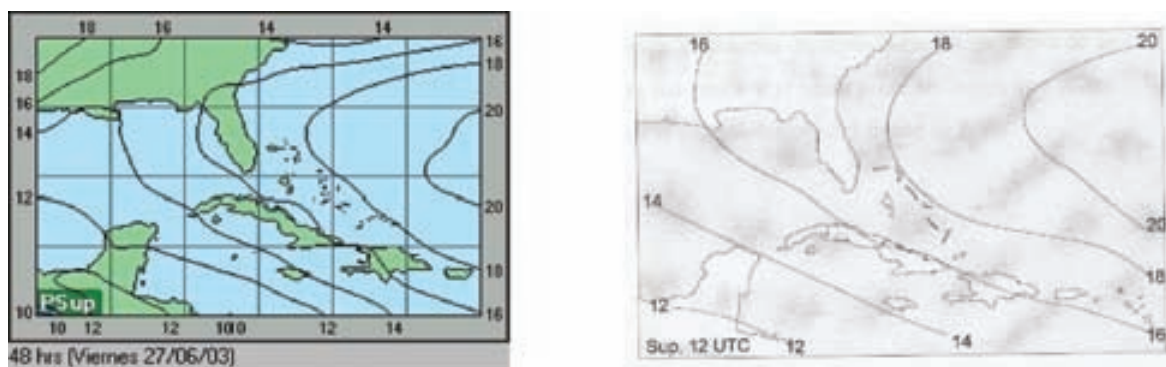


Figura 6 - Comparación entre el pronóstico del ECMWF para el día 27 de junio de 2003 y el Análogo correspondiente, en este caso el tipo E.

## CONCLUSIONES

1. En la provincia de Ciego de Ávila los días con tormentas ocurren con mayor frecuencia hacia la costa Sur y zona Centro Sur de la provincia con cantidades entre 112 y 104 días con este fenómeno al año. Hacia la zona Norte y la cayería Norte este valor oscila entre los 94 a los 83 días respectivamente.
2. En el territorio provincial se distinguen dos períodos bien marcados de los días con tormentas, uno de mayor incidencia que comprende desde finales de mayo a comienzo de octubre y otro de menos incidencia desde la segunda mitad de octubre hasta comienzo de mayo.
3. Como promedio, entre las zonas, los meses de mayor presencia de días con tormentas son septiembre con 18.6 días y agosto con 17.6 días.
4. Los meses de menor presencia de días con tormentas en el territorio son diciembre con sólo 0.5 días con tormentas y febrero con 1.1 días.
5. En la provincia, como media general, dentro de los meses de mayor afectación se destacan la tercera decena de agosto con 7 días con tormentas, seguido por la primera y segunda decenas de septiembre con 6 días.



6. En el período de menor incidencia de días con tormentas hay decenas en los meses en que prácticamente no existen tormentas, como son las dos últimas de diciembre, en que como promedio provincial sólo ocurre un día con tormenta cada 10 años.
7. En el bimestre agosto-septiembre el Análogo que más se presenta en los días con tormentas, en cualquier zona de la provincia es el Análogo E (35.4 %) y el de menor frecuencia el Análogo F con solo 1.2 %.

## REFERENCIAS

1. ALFONSO, A.P. 1992. Descargas eléctricas en Cuba. Aspectos Meteorológicos. En *Revista Cubana de Meteorología*, Volumen 5 No. 2, pp. 99-105.
2. ALFONSO, A.P. 1994. *Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología*. Ed. Academia, La Habana. 168 pp.
3. GANCEDO, O. 1981. *Horarios de formación de las tormentas en Santa Clara y su distribución*. INSMET, Santa Clara, pp. 22-31.
4. PAZOS, C. 1998. *Análisis sinóptico-estadístico del viento en Cuba y la ocurrencia de brisas marinas y tormentas locales severas en la provincia Ciego de Ávila*. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas. Ciego de Ávila. 177 pp.

## SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE HYDROCLIMATIC FEATURES OF THE ECUADORIAN AMAZON BASIN

### VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS CARACTERISTICAS HIDROCLIMATICAS DE LA CUENCA DEL AMAZONAS ECUATORIANO

ALAIN LARAQUE  
Institute for Research and Development- OBHI  
BP 8006 - 97259  
Fort de France, France  
Tel: (0033) 05.96.59.17.18  
Fax: 05.96.50.32.61  
E-mail: alain.laraque@ird-mq.fr;

JOSYANE RONCHAIL  
Paris 7 University - LOCEAN/IPSL  
Case 100, 4 place Jussieu  
5252 Paris Cedex 05, France  
Tel. (0033) 01 44 27 84 67

JEAN LOUP GUYOT  
IRD - LMTG  
Casilla 18 1209 - Lima 18, Perú  
Tel. (00511) 349 6972

GÉRARD COCHONEAU  
IRD - LMTG  
BP 64 501 - 34394 Montpellier  
Cedex 05, France

RODRIGO POMBOSA  
INAMHI  
Iñaquito 700 y Corea  
Quito, Ecuador

#### ABSTRACT

*In Ecuador, Andean hydroclimatology has been studied intensely by INAMHI since the second half of the last century. In the eastern part of this region, which corresponds to the Amazonian Basin, the analysis of the pluviometric and hydrological regimes shows great spatial variation linked with the physiographic heterogeneity (relief, climate, etc.). Mean interannual rainfall ranges from 400 to 900 mm.year<sup>1</sup> in the "Real Mountain Range" and, in the Amazonian Plain, increases to reach 3000 mm.year<sup>1</sup>, but with more regular regimes than in the Andes. This study allows us to present the first isoyets map of the eastern part of Ecuador country. The spatial variation in the runoff is reflected by the specific discharges which vary from 5.2 to 155 l.s<sup>-1</sup>. km<sup>-2</sup>. Together they total nearly 153x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> of water (average for 2001-2002), which is the annual flow of the main hydrological stations of the Aguarico, Napo, Pastaza and Santiago river basins. The Napo is the eastern river with the greatest discharge, followed by the Santiago and Pastaza, with 2100, 1400 and 650 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> respectively.*

*Rainfall and discharge regimes are highly variable in space. They depend on altitude so that different regimes may be found in the same basin. At high locations, rainfall presents a marked bimodal distribution, with a maximum in April and October and a minimum in July-August and in January. This rainfall seasonality is associated with the annual progress of the sun and with the seasonal variability of the zonal wind that uplifts moist air from the Amazon basin.*

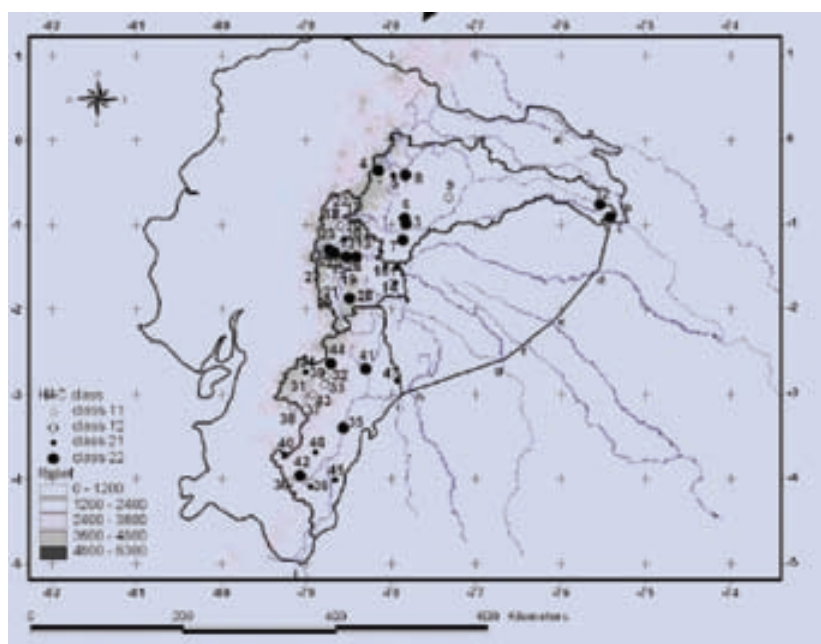
*In small to medium upper basins, two discharge maxima occur along with the two rainfall maxima. However during the July-August period, discharge values do not decrease, probably because of ground water running, of the dominating upper highlands “paramo” formation and to a lesser extent, ice melting.*

*In the lowlands, rainfall and discharge seasonal variability is very weak. Relative maxima are observed in April for rainfall, June for discharge; secondary small maxima are observed in October (rainfall) and November (discharge).*

**Key words:** Ecuador, Napo, Amazon basin, climatology, hydrology.

## INTRODUCTION

The Ecuadorian Amazon basin (known as “Oriente”) covers 135 600 km<sup>2</sup>. This corresponds to the eastern half of Ecuador (Figure 1). It comprises the eastern slope of the Andes and further east, the Amazonian Plain which is covered with rain forest. (Laraque et al., 2004a and 2004b). The hydroclimatic characteristics of the Ecuadorian Amazon basin are heterogeneous, contrasted and complex and have not been very much studied yet. Pourrut (1994) documented the hydroclimatic conditions for the whole country, but only limited information was used on the Amazon basin.



*Figure 1 - Location of the rain gauge stations (see station codes in table 2) and geographic distribution of pluviometric regimes resulting from a Hierarchical Ascending Classification. Regime 1 is bimodal with a marked seasonality; the first maximum is in April in class 11 and in March in class 12. Regime 2 has a low seasonality; in class 21 there are two relative maxima in April and October, in class 22 a relative maximum can be observed in June. Note : the station and river code are presented in the Tab. 2. From North to South : Napo, Pastaza & Santiago Basin*

In the lowlands, rainfall persists throughout the year owing to instability of humid air, with a hydrological regime reaching a peak in June-July and a trough in December-January and with high interannual regularity. Hastenrath and Stefan (1981) mention that the eastern part of the country is subject to moisture-bearing easterly trade winds originating from the tropical Atlantic and the Amazon basin.

The inter Andean valleys between the western and the eastern Cordillera feature two rainy seasons (February-May and October-November) and a first dry season (June-September) which is much

more pronounced than the second one around December (Pourrut, 1994, Vuille *et al.*, 2000). A similar cycle with two maxima in April-May and October-November and two minima in December-January and July-August can also be observed in the tropical Andes in Colombia (Poveda, 2004). The semi-annual cycle of rainfall in the Andes results from the latitudinal oscillation of convection maximum that depends on the annual cycle of temperature and insolation (Horel *et al.*, 1989; Figueroa & Nobre, 1990; Poveda, 2004). The semi-annual cycle is also determined by vapour transport from the Atlantic, by the surface easterlies and medium and upper level circulation (Cuartas and Poveda, 2002). With respect to hydrological regimes, Pourrut (1994) reported two different regimes that is:

- one with two maxima, like rainfall, in March-April and in October-November,
- the other associated with ice melting in the Andes Cordillera. In this case, the maximum occurs in June-July, that is, during the dry season.

Finally, Heredia and Pombosa (1999) recall that this drastic and unusual climatic variability on the Orient of Ecuador, corresponds to the convergence of several climatic influences at the regional and local scale and that the ENSO phenomenon has no influence on the oriental rivers. Laraque *et al.* (2004b), suggest that the proximity of the inter-tropical convergence zone (ITCZ) together with very high and steep slopes may be the cause for the great climatic variability and for the numerous microclimates found in the Andean region.

In this paper, additional information about hydroclimatic annual variability in the Amazon basin of Ecuador is given using the national station network available.

## STUDY AREA

Ecuador is situated in western South America on either side of the Ecuador line which gives its name to the country, between Colombia to the North, Peru to the East and South and the Pacific Ocean to the West. The Andes with a North-South orientation, forms the runoff dividing line between the Pacific Ocean and the Amazon basins. The eastern half of Ecuador located between latitudes N 0°20' and S 4°30', and longitudes W 78° and W 75°, accounts for less than 3% of the total surface area of the Amazon basin ( $6.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ ). This region is divided into two parts: the foreland, which forms the edge of the humid, equatorial plain of the Amazon to the East and the Andean Mountain range to the West. This Cordillera whose summits range between 4,000 and 6,300 masl, the highest covered by glaciers, is interspersed with several volcanoes, some of which are still active today. The eastern side of the "Eastern Cordillera Real" has steep slopes that descend to 500 m over only 100 kilometers. The vegetation changes very quickly with altitude, from the highlands or "paramo" covered by "puna" (Andean name of a kind of tundra formation) at 3,000 masl, to dense equatorial forest that covers the very humid low regions. In 1976, this dense vegetation covered 82% of the eastern Ecuadorian basin (UNESCO, 1980).

The eastern river network drains water towards the east, perpendicularly to the Cordillera, towards the Amazon river. Moving from north to south, the main rivers leaving Ecuador are the San Miguel, Aguarico, Napo, Curaray, Tigre, Corrientes, Pastaza, Morona, Santiago and Chinchipe (Table 1 and Figure 2).

The three biggest eastern hydrographic basins are, in descending order: the Napo, Santiago and Pastaza, covering approximatively 31,400, 26,300 and 21,100 km<sup>2</sup> respectively near the Peruvian border.

Half of the eastern area belongs to the "Andean" region at an altitude of more than 500 m, whereas the other half is part of the Amazonian Plains. It is characterized by the absence of relief and a dense network of rivers crossing the rainforest. Three river basins (Curaray, Tigre, Corrientes) exhibit pure "Amazonian" characteristics, while two others (Santiago and Chinchipe) are completely "Andean". All the others have a mountainous terrain accounting for 20 to 70% of their total area.

Table 1 - Basins of the Ecuadorian Amazon basins and their characteristics: surface, percentage of the surface above 500m (in the Andes).

Code Fig. 1	Basins (from North to South)	Total Area (km <sup>2</sup> )	Andes Area (sup.> 500 m in km <sup>2</sup> )	% (Andes)
a y a'	Putumayo y San Miguel	7 130	1 400	19,6
b	Aguarico - A.J. Napo	13 890	4 480	32,3
c	Napo - A.J. Aguarico	31 410	14 020	44,6
d	Curaray - Frontera	16 700	510	3,1
e	Tigre	7 100	2	0,0
f	Corrientes	2 020	90	4,5
g	Pastaza - Frontera	21 140	14 630	69,2
h	Morona - Frontera	6 720	2 720	40,5
l	Santiago - Frontera	26 340	26 090	99,1
J	Chinchi - Frontera	3 140	3 140	100,0
	Total Oriente Ecuador	<b>135 590</b>	<b>67 082</b>	<b>49,5</b>

Legend: A.J.: Before Junction ; D.J.: After Junction

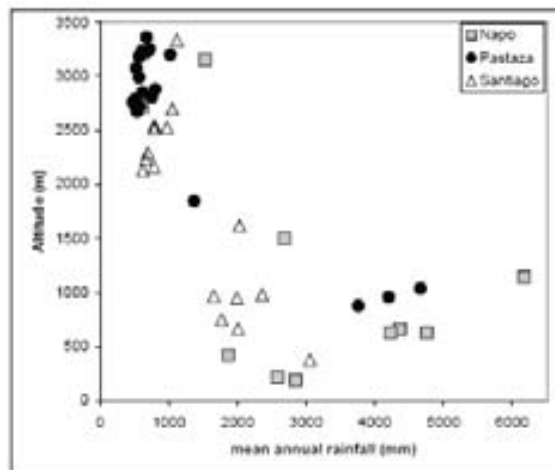


Figure 2 - Annual average precipitations vs. altitude in the Napo, Pastaza, and Santiago river basins.

## DATA AND METHODOLOGY

The INAMHI manages the hydroclimatological network of Ecuador, that is 159 climatological stations and 61 hydrological stations, in the Amazon region. These networks are less dense in the plain, which is difficult to access. Many of the stations were not used in this work as the series were either incomplete or too short. Those with long lasting pluviometric and fluviometric records (spanning between 20 and 30 years, between 1965 and 85 or 1965 and 95) and with continuous data, were retained. The main characteristics of the right stations (47 pluviometric and 25 hydrometric) are listed in tables 2 and 3. Since most stations are located in the Andes, some lowland stations with short series (10 years) are used for the analysis of the hydrological regime.

The historical hydrological station network of INAMHI was completed in 2001 during the HYBAM project (Laraque *et al.*, 2004a, 2004b), by the opening of Puente La Union St. (Pastaza basin) and Puerto Santiago St. (Santiago basin) (Table 3) to monitor the largest part possible of these basins. As the discharge curves are still incomplete for the last two stations which have recently been implemented, we can only have a rough idea of the magnitude of the flows which pass through them, and we do not use these stations to analyse the regime of the rivers.

Rainfall and discharge regimes have been analysed using a Hierarchical Ascending Classification (HAC) and applying the Ward criteria that maximizes inter class variance (Ward, 1963). Rainfall and discharge indices are computed in order to classify the stations as a function of their annual cycle and not of the quantity of water. For each month the pluviometric index is the monthly rainfall divided by one twelfth of the annual rainfall. The hydrometric monthly index is the mean monthly discharge divided by the annual discharge.

Khi<sup>2</sup> test is employed to verify whether rainfall or discharge regimes are related to the geographical characteristics of the station (watershed, altitude, size of the basin).

## RAINFALL AND DISCHARGE REGIMES

### Rainfall distribution and rainfall regimes

The *mean annual precipitation* in the Amazon basin of Ecuador is 2,800 mm (Armijos, 2002). This value which is amongst the highest in the Amazon basin, is due to specific humidity and convection, orographic lifting of moist air and the large scale concave shape of the Andes that promote enhanced low-level convergence (Figueroa and Nobre, 1990).

Table 2 shows an extreme variation of annual rainfall ranging from 434 mm.year<sup>-1</sup> (Riobamba airport station in the Pastaza basin at 2,760 masl) to 6,172 mm.year<sup>-1</sup> (Reventador station in the Napo basin at 1,145 masl).

Figure 2 shows that the overall rainfall decrease with altitude seems to vary from a river basin to another. A low gradient is observed in Santiago basin and a strong one along Pastaza. However, this may be due to the station sampling. A rainfall gradient for the Amazon basin of Ecuador cannot be proposed.

An isohyets map for the Amazon basin of Ecuador, obtained from data in Table 2, is presented in Figure 3. It shows the altitude rainfall dependence and very heavy rainfall in the Napo basin, where the Andes border exhibits some kind of concave design. This map of eastern Ecuador is a more accurate supplement to the one produced by Pourrut (1994). Rainfall decreases from North to South with 3,100 mm.year<sup>-1</sup> in the Napo basin, 2,300 mm.year<sup>-1</sup> in the Pastaza basin, and finally 2,000 mm.year<sup>-1</sup> in the Santiago basin (Figure 3). These values are due to morphological features i.e. increasingly mountainous region from north to south, in the basins: the proportion of high terrains (above 500 masl) are 45, 69 and 99 % in the Napo, the Pastaza and the Santiago basins, respectively.

Temperature decreases with altitude ranging from annual 10°C at 3,000 masl to 25.5°C at 200 masl (Table 2).

**Seasonal rainfall variability**, measured by the pluviometric index (PI = quotient between the maximum and minimum monthly rainfall - Table 2) tends to decrease with an increase in the interannual averages of precipitation (Figure 4 –to facilitate reading, the extreme 14.8 PI value of Giron station is not given). Generally the highest rainfall values are associated with regular pluviometric regime and are more frequent in the plain. However exceptions can be found. For example, in the Napo basin, Reventador (1,145 masl) features a lower PI value (1.4 PI at 1,145 masl) than Loreto station (2.9 PI value at 420 masl). PI values in the mountainous Pastaza basin are highly variable (1.5 to 6).

Table 2 - Rain gauge stations and their characteristics: basin, altitude, data period, mean annual temperature, mean annual rainfall, regime, PI (ratio between maximum and minimum rainfall)

Code (fig. 1)	Code INAMHI	Pluviometric Station	Basin	Altitude (m)	Data	Period	Temp. (°C)	Annual rainfall (mm)	Regime	PI(*)
1	M007	Nuevo Rocafuerte	Napo	189	1976	1999	25.2	2848	2-2	2.4
2	M068	Tiputini Aeropuerto	Napo	219	1954	1988	25.6	2582	2-2	2.5
3	M070	Tena	Napo	665	1951	1994	23.5	4364	2-2	1.9
4	M188	Papallacta	Napo	3150	1949	1994	9.7	1529	2-2	2.8
5	M203	Reventador	Napo	1145	1973	1993	18.4	6172	2-1	1.4
6	M484	Archidona	Napo	630	1964	1994		4230	2-2	1.9
7	M485	Zatzayacu (Arosemena Tola)	Napo	628	1964	1993		4754	2-2	1.9
8	M486	Borja-Mision Josefina	Napo	1500	1965	1994		2683	2-2	2.0
9	M563	Loreto	Napo	420	1963	1985		1865	1-2	2.9
10	M004	Rumipamba-Salcedo	Pastaza	2680	1963	1999	14.2	568	1-2	3.7
11	M008	Puyo	Pastaza	960	1960	1999	20.8	4462	2-1	1.5
12	M028	Ambato - Granja	Pastaza	2680	1905	1999	13.8	483	1-1	2.7
13	M029	Banos	Pastaza	1846	1917	1994	17.0	1366	2-2	3.3
14	M041	Sangay (P.Santa Ana)	Pastaza	880	1967	1994	21.4	4008	2-1	1.6
15	M057	Riobamba Aeropuerto	Pastaza	2760	1934	1999	13.6	437	1-1	4.1
16	M063	Pastaza Aeropuerto	Pastaza	1038	1944	1985	20.6	4958	2-1	1.6
17	M064	Latacunga Aeropuerto	Pastaza	2785	1934	1999	13.5	470	1-1	5.0
18	M088	Pujili (4 Esquinas)	Pastaza	3230	1963	1990	12.6	618	1-1	4.9
19	M094	La Granga-Chimborazo	Pastaza	2720	1967	1991	13.8	574	1-1	3.3
20	M127	Pillaro	Pastaza	2805	1931	1996	13.1	736	2-1	1.9
21	M133	Guaslan	Pastaza	2850	1964	1998	14.1	617	1-1	4.0
22	M365	Guaytacama	Pastaza	3075	1951	1996		524	1-1	5.1
23	M369	Cusubamba	Pastaza	2990	1963	1996		563	1-1	5.1
24	M376	Pilahuin	Pastaza	3360	1935	1997		646	2-2	2.0
25	M377	Tisaleo	Pastaza	3250	1932	1996		692	2-2	2.0
26	M380	Huambalo	Pastaza	2880	1964	1996		815	2-2	2.7

Code (fig. 1)	Code INAMHI	Pluviometric Station	Basin	Altitude (m)	Data	Period	Temp. (°C)	Annual rainfall (mm)	Regime	PI(*)
27	M393	San Juan Chimborazo	Pastaza	3220	1963	1996		687	1-1	6.7
28	M396	Alao	Pastaza	3200	1964	1996		1039	2-2	2.7
29	M398	Palmira Inamhi	Pastaza	3180	1935	1992		545	1-1	6.0
30	M033	La Argelia-Loja	Santiago	2160	1930	1999	15.8	848	1-2	2.8
31	M067	Cuenca Aeropuerto	Santiago	2516	1930	1999	14.9	803	1-1	4.1
32	M138	Paute	Santiago	2289	1963	1999	17.3	735	1-2	2.5
33	M139	Gualaceo	Santiago	2230	1963	1999	17.1	738	1-2	3.4
34	M141	El Labrado	Santiago	3335	1963	1994	8.4	1259	2-1	1.8
35	M189	Gualaquiza Inamhi	Santiago	750	1977	1994	22.4	1957	2-2	2.4
36	M207	Zamora	Santiago	970	1964	1992	21.8	1936	2-1	1.5
37	M418	Cumbe	Santiago	2720	1963	1994		665	1-1	2.7
38	M419	Giron	Santiago	2130	1959	1994		764	1-2	14.8
39	M426	Ricaurte-Cuenca	Santiago	2545	1962	1994	14.3	887	1-1	5.0
40	M432	San Lucas Inamhi	Santiago	2525	1963	1996		1123	2-1	2.1
41	M501	Mendez Inamhi	Santiago	665	1935	1994		2160	2-2	2.1
42	M503	San Francisco-San Ramon	Santiago	1620	1953	1994		2256	2-2	2.6
43	M541	Cochapamba-Quingeo	Santiago	2760	1975	1993		740	1-2	4.3
44	M583	Pindilig	Santiago	2700	1963	1990		1131	2-2	2.7
45	M679	Huaysimi	Santiago	950	1975	1992		2346	2-1	1.4
46	M682	Yacuambi en La Paz	Santiago	980	1979	1989		2800	2-1	1.7
47	M712	Yaupi	Santiago	380	1982	1988		3604	2-1	1.6

(\*) ratio between maximum and minimum monthly rainfall



Table 3 - Fluvioimetric stations and their characteristics: river, main river, surface of the basin, altitude, data period, mean annual discharge, specific discharge, annual runoff, regime, HI (ratio between maximum and minimum discharge). Legende: A.J.: Before Junction ; D.J.: After Junction

Code Fig. 5	Code INAMHI	River	Hydrometric Station	Basin	Area (km <sup>2</sup> )	Altitude (m)	Data	Period	Mean annual Q (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Specific Q (l.s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup> )	Runoff (mm.year <sup>-1</sup> )	Regime	HI (*)
1	H-722	Yanahurco	D.J. Valle	Napo	87	3,590	1964	1996	2.2	25.8	813	2-2	3.7
2	H-721	Jatunyacu	D.J. Ilocullin	Napo	3,128	570	1966	2003	296.0	94.6	2,984	2-1	1.8
3	HB-25	Napo	F. de Orellana	Napo	12,401	262	1986	2003	1,086	87.6	2,761	1-2	1.7
4	H-718	Quijos	Baeza	Napo	866	1,770	1964	1997	51.7	59.7	1,884	2-1	2.2
5	H-731	Cosanga	A.J. Quijos	Napo	495	1,740	1970	1996	49.3	99.7	3,144	2-1	3.0
6	H-733	Quijos	A.J. Borja	Napo	1,533	1,635	1978	1992	90.6	59.1	1,864	2-1	2.6
7	H-719	Quijos	D.J. Oyacachi	Napo	2,461	1,490	1965	1994	203.0	82.5	2,602	2-1	2.2
8	HB-26	Napo	Nvo. Rocafuerte	Napo	27,387	189	1983	2003	2,030	74.0	2,334	1-2	1.9
9	H-789	Guargualla	A.J. Cebadas	Pastaza	185	2,828	1965	1997	5.8	31.3	988	2-1	2.3
10	H-787	Alao	Hacienda Alao	Pastaza	124	3,200	1963	1998	10.7	86.9	2,739	2-1	2.6
11	H-788	Puela	A.J. Chambo	Pastaza	185	2,460	1965	1997	17.6	94.7	2,988	2-1	2.2
12	H-792	Cutuchi	A.J. Yanayacu	Pastaza	2,423	2,592	1965	1998	12.9	5.3	168	1-2	1.6
13	H-800	Pastaza	Baños	Pastaza	7,938	1,729	1964	1996	104.1	13.1	414	2-1	2.3
14	H-781	Verde	A.J. Pastaza	Pastaza	136	1,315	1964	1997	19.6	144.4	4,553	2-2	4.1
15	H-888	Zamora	D.J. San Fco.	Santiago	1,125	1,590	1965	1992	45.5	40.4	1,275	2-1	2.9
16	H-886	Sabanilla	A.J. Zamora	Santiago	185	1,080	1964	1992	28.8	155.1	4,891	2-1	2.0
17	H-884	Zamora	A.J. Bomboiza	Santiago	6,825	800	1975	1997	652.7	95.6	3,016	1-2	1.5
18	H-897	Surucucho	A.J. Llullucchas	Santiago	62	3,030	1968	1992	1.1	18.5	583	1-1	2.1
19	H-896	Matadero	Sayausi	Santiago	309	2,685	1964	1991	6.7	21.6	682	1-1	2.3

20	H-893	Yanuncay	A.J. Tarqui	Santiago	420	2,470	1964	1989	6.6	15.7	496	1-1	2.9
21	H-895	Tomebamba	Monay	Santiago	1,286	2,420	1964	1992	17.6	13.7	432	1-1	2.5
22	H-900	Paute	A.J. Dudas	Santiago	4,006	2,075	1963	1991	71.0	17.7	559	2-1	2.8
23	H-902	Dudas	Pindilig	Santiago	87	2,450	1964	1993	3.3	38.0	1,197	2-2	3.4
24	H-892	Mazar	A.J. Paute	Santiago	156	2,250	1972	1993	4.8	30.5	961	2-2	2.8
25	H-908	Upano	Tutamangoza	Santiago	3,423	550	1978	1992	297.8	87.0	2,743	12	2.3
		Pastaza	Puente La Union	Pastaza	12,660	663	2001	2003	730	58	1,830		1.7
		Santiago	Santiago	P. Santiago	24,700	320	2001	2003	1,530	62	1,950		2.7

(\*) ratio between maximum and minimum monthly discharges in *italique* is presented the two main hydrological stations of Pastaza and Santiago basin, with only 3 years of data

Maximum PI value per basin rises from the north to the south, from 3 (Napó basin) to 7 (Pastaza basin) and 15 (Santiago basin, not shown in Figure 4), while minimum PI values remain the same in all the basins. The low variability in the lowlands is also observed at interannual time scale (Rossel, 1997).

To better assess this regime diversity, a hierarchical ascending classification (HAC) based on the monthly rainfall indices of 47 rainfall stations is performed using the Ward criteria and Euclidian distance. Monthly rainfall indices are the quotient between monthly rainfall and one twelfth of annual rainfall. The set of stations is divided into two main clusters that, in turn, can be divided into two sub-clusters (Table 2).

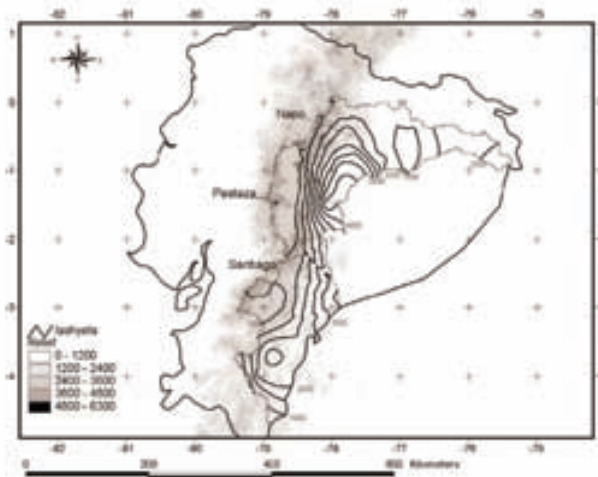


Figure 3 - Isohyets map of the Amazonian basin of Ecuador. Note: the values of isoyet lines are in  $\text{mm}\cdot\text{year}^{-1}$

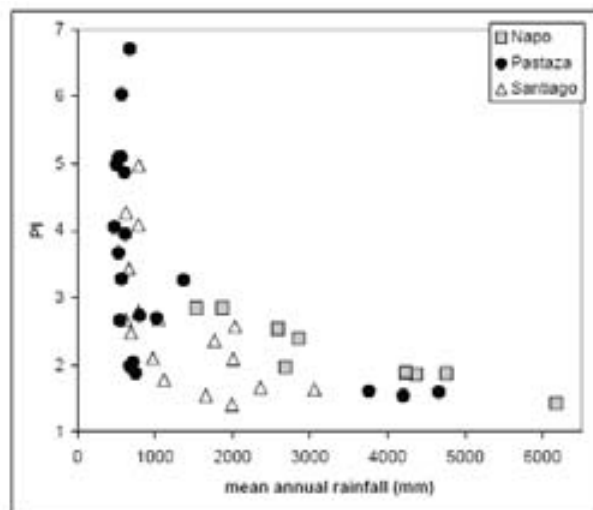


Figure 4 - Seasonal rainfall variability (PI, quotient between maximum and minimum rainfall) vs. altitude in the Napó, Pastaza, and Santiago river basins.

In cluster 1 (20 stations out of 47), two rainfall maxima, after the equinox, in April and October, are separated by two minima, around the solstices, in July-August and December-January, the first minimum being more pronounced than the second minimum. In this cluster, rainfall seasonality is strong. In cluster 1-1 the maximum (minimum) values are slightly higher (lower) than in cluster 1-2, featuring a strong seasonal difference. In particular, the first maximum is in April in cluster 1-1 and in March cluster 1-2.

In cluster 2 (27 stations out of 47), rainfall variability during the year remains low. However, a relative peak can be identified in April in cluster 2-1 and in June in cluster 2-2. In cluster 2-1 a secondary maximum appears in October, after a relative minimum in August. In both clusters, a relative minimum is registered in December-January.

Khi<sup>2</sup> tests have been performed to assess whether rainfall regime depends on the altitude of the stations and on the basin (Napo, Pastaza, Santiago). Relationships between rainfall regimes and these variables are significant at the 99% level (Table 4). They show that the stations with a bimodal regime, belonging to cluster 1 (1-1 or 1-2), are mainly observed at high altitude, over 2,000 meters, in the westernmost regions (Figure 1). As high stations are mainly located in the Pastaza and the Santiago basins, cluster 1 stations are generally observed in these basins. Regime 1-2 is mainly observed in the southernmost Santiago basin.

Toward the east, at a lower altitude, stations with a weaker rainfall cycle (cluster 2) can be found (Figure 1). However, the reciprocity is not true as 30 to 40 % of group 2 stations are located higher than 2,000 masl. Regime 2-1 is often observed at a lower elevation (below 2,000 meters) and in the Santiago and Pastaza basins. Regime 2-2 presents some ubiquity as observed at any altitude. It is mainly observed in the northern basins (Napo and Pastaza).

*Table 4 - Altitudinal and per basin distribution of the rain gauge stations as a function of the rainfall regime group (values are in percentage).*

Altitude	0-1000 m	1000 - 2000	2000 - 3000	3000 - 4000	Total
11	0	0	69	31	100
12	14	0	86	0	100
21	55	18	18	9	100
22	44	19	13	25	100

Basin	Pastaza	Napo	Santiago	Total
11	77	0	23	100
12	14	14	71	100
21	36	9	55	100
22	31	44	25	100

Rainfall maximum (regimes 1) or relative rainfall maximum (regime 2-1) occurring just after the equinox are related to intense warming and convection. The difference in the strength of the annual cycle between the high Andes slopes and the lowlands may be associated with the dependence of the highland region upon water vapour uplift. In particular the water vapour uplift toward the high Andes is favoured in March-April, by the eastern winds which are stronger and more zonal than during other periods of the year at low levels (Figueroa and Nobre 1990). In June-July, a cooler period can be observed with less convection and a strong gradient in wind speed from north to south. This may account for the relative rainfall maximum in the Napo and Pastaza basins (regime 2-2). From October to January, the eastern wind is slow and not as zonal as during the rest of the year. A short second rainfall maximum can be observed in October-November after the equinox and very little rain is measured in December-January. In the lowlands, water vapour is always sufficient and the rainfall annual cycle remains low.

### Hydrological means and regimes

With respect to the Amazon basin, several hydrological studies focusing on the Andean part of the Ecuador have been conducted (Erazo & Hoorelbeke, 1999; Hoorelbeke & Perez, 1999; Hoorelbeke *et al.*, 1999, Pérez, 2000, Moreno & Tapia, 2001), but so far, the Amazon basin has not been investigated owing to a lack of hydrological stations.

Data from 27 INAMHI hydrometric stations (2 from the Hybam project) (Table 3 & Figure 5) distributed throughout the eastern mountain range (22 stations) and in the lowlands (5 stations below 550 masl) of the three main river basins has been analyzed. To give an idea of their hydrological features, and though little data has been acquired yet, the hydrological stations “Puente La Union” and “Puerto Santiago” that close the Pastaza and Santiago basins at the foot of the Andes, are presented.

The stations between 190 and 3,600 masl control river basins that cover an area of 41 to 27,000 km<sup>2</sup>.

From North to South, *the average discharge* of the Napo (1983-2003 period), Pastaza and Santiago basins (2001-2003 period), at the main downstream hydrological stations are 2,030, 730 and 1,530 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> respectively. The Napo is the biggest eastern river, followed by the Santiago and the Pastaza rivers. Altogether, a water volume of about 153x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (that is 4,800 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) is exported annually through these stations.

In the 25 eastern selected basins, the specific discharge (Qs) shows great spatial irregularity with variations from 6.4 (subbasin of Cutuchi in A.J. Yanayacu station in the Pastaza basin) to 155 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> (subbasin of Sabanilla at A.J. Zamora station in the Santiago basin). The importance of the latter value may correspond to a microclimate. For comparison purposes, Guyot *et al.*, (1996) found a Qs of 140 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> on a basin of 160 km<sup>2</sup> in Bolivia. But this basin is situated in the Chapare region, one of the wettest Amazonian basins, with precipitation in excess of 4000 mm.year<sup>-1</sup> in the Amazon foothills of the Oriental Cordillera of Andes. The lowest values are found in the Andean area (between 6 & 80 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> for an altitude greater than 1,500 masl) while the highest are in the foreland and the Amazonian Plain (between 80 & 155 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> for an altitude less than 1,500 masl) (Figure 6). However, no relationship can be found between Qs and altitude. In general, in the Andes, specific discharge (Qs), like rainfall, increases while altitude decreases (Laraque *et al.*, 2004b). Downstream, Qs decreases with altitude. For example, Qs decreases from 95 to 87 and 74 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> respectively for Illoculin (500 masl), Francisco de Orellana (262 masl) and Nuevo Rocafuerte (189 masl) in the Napo basin.

Seasonal hydrometric variability, described by the hydrometric index (HI = quotient of the extreme monthly discharges - Table 3) ranges from 1.5 to 4.1 in the eastern Ecuadorian hydrometric network. There is no apparent correlation between the HI and the drained area, or with annual or specific discharge.

A hierarchical ascending classification is employed to identify the main *discharge regimes* (Table 3). Two well-differentiated clusters can be described as in the case of precipitations. They are divided into two sub-clusters.

Cluster 1 shows a low seasonal variability with a maximum in April (cluster 1-1) or in June (cluster 1-2) and a very low second maximum in October. The lowest values are in December-January.

Cluster 2 shows a marked seasonality with high discharge values in July and low values in December-January. Seasonality is stronger in cluster 2-2.

Khi<sup>2</sup> test is employed to analyze the relationships between regime and basin (Napo, Pastaza or Santiago), altitude and size of the basin. The regime is independent of the basin. But they are significant at the 99% level between regime and altitude and at the 95% level between regime and size of the basins (these physical characteristics themselves are correlated as big basins are generally at low elevation).

Regime 1-1 is observed at high altitude in small to medium basins (Table 5). This regime is observed in the upper Santiago basin (points 18 to 21 in Figure 5). The relative discharge peaks occur at the same time as rainfall peaks ; however, discharge remains at a high level in June-July. This may be related to ice melting in basins located under glaciers and to the presence of hanging aquifers in the thick volcanic porous ash layers in the “paramo” formation above 3,000 masl scattered in this region. Peat of volcanic origin, with its attendant “puna” vegetation is soaked with rainwater throughout the year and often several meters deep. These vast expanses of volcanic ash spongy soils are scattered with numerous lakes, swamps and bogs. They often cover ancient glacial valleys and exhibit a high propensity for great water storage. Recent studies (Williams *et al.*, 2001, Buytaert *et al.*, 2004) have described the characteristics of this original formation and reviewed its impact on the flow river

regime. The slow outlet from these superficial aquifers, completed by ice melting, may help sustain the flow regimes of small basins at high altitude, during the dry season (May to September). Francou *et al.* (2004) indicate that the mean ablation rates remain constant all year round. But Francou *et al.* (2004) and Favier *et al.*, (2004), also mention a low runoff increase at the foot of glaciers, usually taking place one or two months after the equinox. It corresponds to melting and rainfall maximum. This is amplified during warm events in the Pacific (El Niño).

Table 5 - Altitudinal and per basin size distribution of the fluviometric stations belonging to each regime group (values are in percentage).

Altitude	0-1000m	1000-2000m	>2000m	Total
11	0	0	100	
12	80	0	20	
21	14	57	29	
22	0	25	75	

Basin surface (km <sup>2</sup> )	<200 km <sup>2</sup>	200-1000 km <sup>2</sup>	1000-5000 km <sup>2</sup>	>10000 km <sup>2</sup>	Total
11	0	0	69	31	100
12	14	0	86	0	100
21	55	18	18	9	100
22	44	19	13	25	100

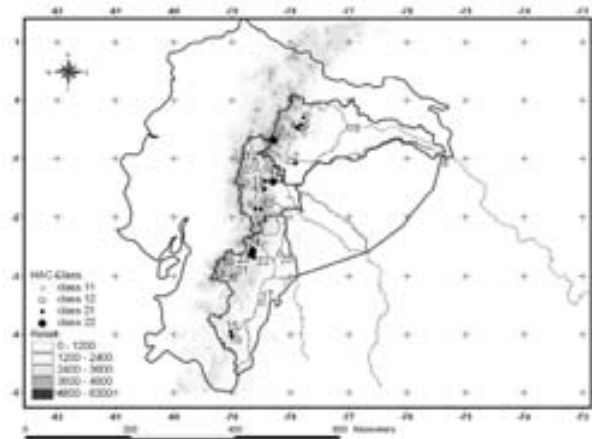


Figure 5 - Distribution of the hydrometric stations (see station codes in table 3) and geographic distribution of hydrometric regimes resulting from a Hierarchical Ascending Classification. Regime 1 has a low seasonality with a relative maximum in April (class 1-1) or in June (class 1-2). The maximum is in July in regime 2, with a low seasonality for class 2-1 and a higher one for class 2-2. Note: the station code are presented in the Tab.

3. From North to South : Napo, Pastaza & Santiago Basin

Regime 1-2 is characteristic of big basins located in the lowlands. This regime is typical of Coca (point 3) and Nueva Rocafuerte (point 8) on the Napo, Bomboisa and Tutamangosa (points 16 and 24) on tributaries of the Santiago River. In the lowlands, as basins are large, the relative discharge peak in June follows the April rainfall peak.

Regime 2-2 is located at a high elevation and in small basins (< 150km<sup>2</sup>), in the upper basin of the Napo, Santiago and Pastaza. The July peak can be associated with rainfall regime 2-2.

Regime 2-1 is observed at medium to high elevation, in any basin. This annual cycle is very similar to the former one, although it is smoother. The July peak may be associated with the rainfall peak observed in the Napo and Pastaza basins (rainfall regime 2-2). Discharge regime 2-1 is observed eastward of Quito, in the Napo basin (points 4 to 7 on Figure 5), in the region of Baños in the Pastaza basin (points 9 to 13) and in the Loja area in the southern Santiago basin (points 15 and 16).

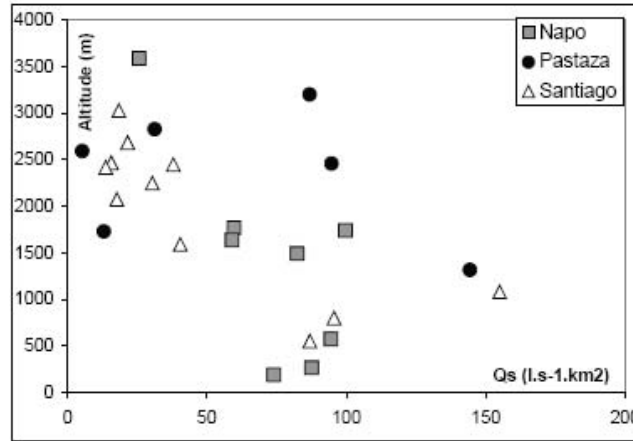


Figure 6 - Specific discharge volumes vs. altitude in the Napo, Pastaza, and Santiago river basins.

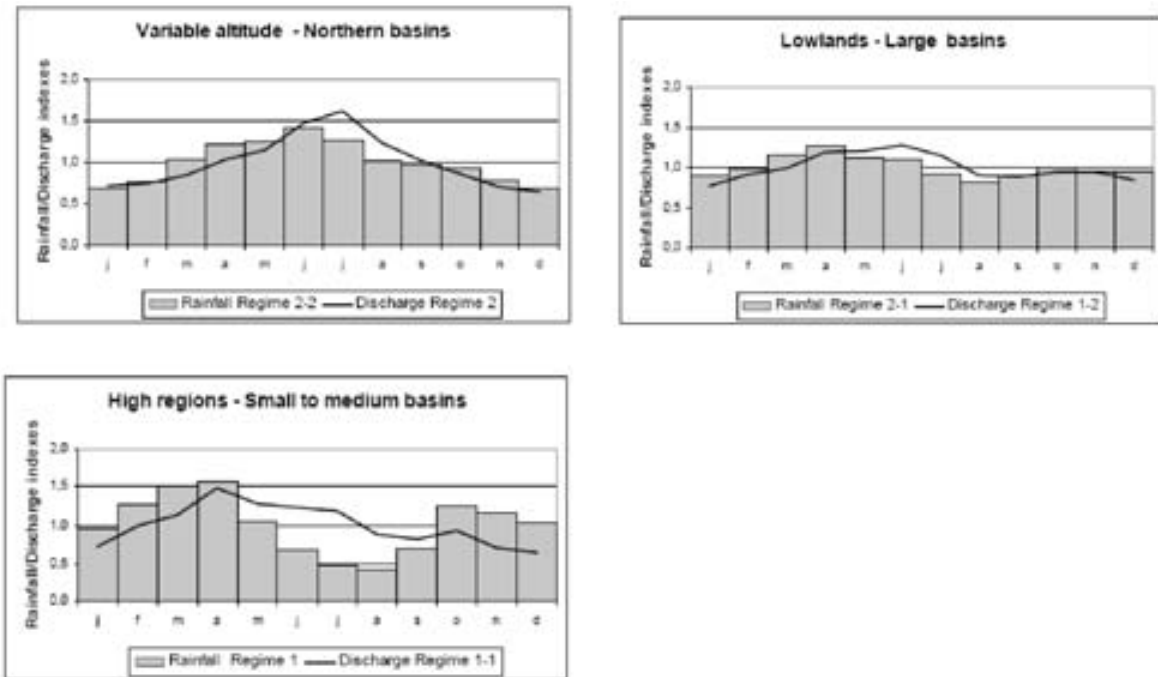


Figure 7 - Rainfall and hydrological regimes in different regions of the Ecuadorian Amazon basin.  
a) High regions; b) Lowlands; c) Northern basins

## CONCLUSION

River basins in the eastern Ecuadorian Amazon present high spatial rainfall variability between very rainy lowlands ( $4,000 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$ ) and highlands with little precipitations ( $500 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$ ). This altitudinal variability can also be observed in the eastern slopes of the tropical Andes in Bolivia

(Ronchail & Gallaire, 2005). It can be related to the diminished moisture supply at high altitude. Obviously, discharge is higher in the lowland stations that control big basins.

Annual rainfall variability during the year is as important in the upstream basins in the eastern slopes of the Andes as it is in the inter Andean basins of Ecuador and Colombia. The rainfall annual cycle presents a marked bimodal distribution, with a main peak in April and a second one in October. This is related to an increased convection after the equinox and, in April, to an enhanced zonal circulation and moisture uplift.

In small to medium basins, two discharge maxima can be observed during the two rainfall maxima (Figure 7a). However, discharge variability during the year is not as strong as that of rainfall; in particular, the marked July-August rainfall decrease does not evidence in discharge data. The sustained dry season discharge (May to September) may be accounted by water outflow from the upper Andean "paramo" spongy soils covered with bogs and marshes, and to a lesser extent, by water release from ice melting in some regions.

In the lowlands rainfall and discharge variability is very low (Figure 7b). Although a relative maximum is registered in April for rainfall, in June for discharge; a secondary low maximum can be observed in October (rainfall) and November (discharge). This annual cycle is highly similar to that encountered in the Brazilian lowlands and more generally in western Amazon (Ronchail *et al.*, 2002).

Finally, rainfall and discharge regime, with a low seasonal variability and relative maximum in July, are observed at any altitude, mostly in the northern region of the Ecuadorian Amazon basin. Low seasonal variability may be related to the ubiquity of the stations and the July maximum to a peak in the zonal uplift of moist air and to the water release from "paramo" peat at high altitude (Figure 7c).

Of course these heterogeneous rainfall regimes make it difficult to predict flow in most important eastern rivers of Ecuador. However with its extensive network of eastern rivers providing annually some  $153 \times 10^9 \text{ m}^3$  of water out of Ecuador, the economy of the country can be greatly developed enabling commercial exchange within the rest of the Amazonian basin.

To conclude, Ecuador is not only characterized by active geodynamics. This paper has tried to understand other specific regional specificities like the important spatial hydroclimatic heterogeneity and discrepancies between rainfall and runoff. The characteristics of the eastern slopes of the Andes in Ecuador (latitudinal position, relief, exposition to the main winds, soils,..) cause this diversity and for example the specific discharge values ( $5.3$  to  $155 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ ).

## REFERENCES

1. ARMIJOS, E. 2002. Estudio hidrofísico de las cuencas de los ríos Napo, Pastaza y Santiago dentro del proyecto Hybam. Tesis de ingeniería civil de la UCE (Universidad Central de Ecuador), 126 p. + anexos.
2. BUYTAERT, W., B. DE BIÈVRE, G. WYSEURE, J. DECKERS, 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes. *Hydrology and Earth System Sciences* 8: 108-114.
3. BUYTAERT, W., J. DECKERS, G. DERCON, B. DE BIÈVRE, J. POESEN, G. GOVERS. 2002. The influence of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use and Management* 18: 94-100.
4. CUARTAS, L. A. & G. POVEDA, 2002. Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia según el Reanálisis NCEP/NCAR. *Meteorología Colombiana*, 5, 49-57.
5. ERAZO, A., & HOORELBECKE, R. 1999. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Pastaza. Publ. HIBAM, Quito, 46p.
6. FIGUEROA, S. N. & C. NOBRE 1990. Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanalyse*, 5, 36-47.



7. FAVIER, VINCENT, PATRICK WAGNON, and PIERRE RIBSTEIN, 2004. Glaciers of the outer and inner tropics: A different behaviour but a common response to climatic forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16403, August 27, 2004.
8. FRANCOU, B., VUILLE, M., FAVIER, V., CACERES, B., 2004. New evidence for an ENSO impact on low latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *J. Geophys. Res.*, 109, D18106.
9. GUYOT, J. L., FILIZOLA, N., QUINTANILLA, J., CORTEZ, J. 1996. Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon, 55-63. *Erosion and Sediment yield : Global and Regional Perspectives*, IAHS Publ. 236. Exeter, July 1996.
10. HASTENRATH & STEFAN, 1981. The glaciation of the Ecuadorian Andes: Rotterdam, A.A. Balkema Publishers, 159 p.
11. HEREDIA E, & POMBOSA, R. 1999. Influencia del ENSO sobre los caudales mensuales de las grandes cuencas hidrográficas del Ecuador. *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brasil.
12. HOORELBECKE, R. & PEREZ, V., 1999. Datos meteorológicos de la cuenca del Río Napo. Publ. HIBAM, Quito, 213 p.
13. HOORELBECKE, R., POMBOSA, R., ROURA, J. 1999. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Santiago. Publ. HYBAM, Quito, 35p.
14. HOREL, J. D., A. N. HAHMANN & J. E. GEISLER. 1989. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *J. of Climate*, 2, 1388-1403.
15. LARAQUE, A., CÉRON, C., ARMIJOS, E., POMBOSA, R., MAGAT, P. & GUYOT, J. L., 2004a. Sediment yields and erosion rates in the Napo River Basin: an Ecuadorian Andean Amazon tributary. In: *Sediment Transfer through the Fluvial System* (ed. by V. Golosov, V. Belyaev & D. E. Walling), 220–225. IAHS Publ. 288. IAHS Press, Wallingford, UK.
16. LARAQUE, A., GUYOT J. L., POMBOSA, R. 2004b. Hidroclimatología de la cuenca amazónica del Ecuador y su hidrosedimentología (Ejemplo de la cuenca del Napo). *Geología de la cuenca Oriente* (Baby P., Rivadeneira M., Barragan R., Eds.). IRD, IFEA, PETROECUADOR. p.131-151.
17. MORENO, F. & TAPIA, A., 2001. Regionalización hidrometeorológica de las cuencas amazónicas. Tesis de ingeniero civil de l'UCE (Universidad Central de Ecuador), 75 p. + anexos.
18. PEREZ, V., P., 2000. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Napo. Tesis, Universidad Central del Ecuador, Quito, 132 p.
19. POURRUT, P., 1994. Climat de l'Equateur. In *L'eau en Equateur, Principaux acquis en hydroclimatologie*. ORSTOM Editions, 146 p.
20. POVEDA, G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia de Ciencias* (28) 107, 201-222.
21. RONCHAIL, J., COCHONNEAU, G., MOLINIER, M., GUYOT, J. L., GORETTI DE MIRANDA CHAVES, A., GUIMARÃES, W. and DE OLIVEIRA, E. 2002. Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in the tropical Pacific and Atlantic oceans. *International Journal of Climatology*. 22: 1663-1686.
22. RONCHAIL, J. & GALLAIRE, R. 2005. ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia), from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology*.
23. ROSSEL, F. 1997. Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l'Equateur. Thèse Univ. Montpellier. 289 p.

24. UNESCO, 1980. Carte de la végétation d'Amérique du sud. Echelle : 1/5 000 000, Ed. UNESCO.
25. VUILLE, M., BRADLEY, R. S., KEIMIG, F., 2000. Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperatures anomalies. J. Climate, 13, 2520-2535.
26. WARD, J. H. 1963. Hierarchical clustering to optimize an objective function. J. American Stat. Assoc., 58, 236-245.
27. WILLIAMS, M. W., HOOD, E. W., OSTBERG, G., FRANCOU, B. & GALARRAGA, R, 2001. Synoptic survey of surface water isotopes and nutrient concentrations, páramo high elevation region, Antisana ecological reserve, Ecuador, Arctic, Antarctic and Alpine Research, 33, 4 : 397-403.

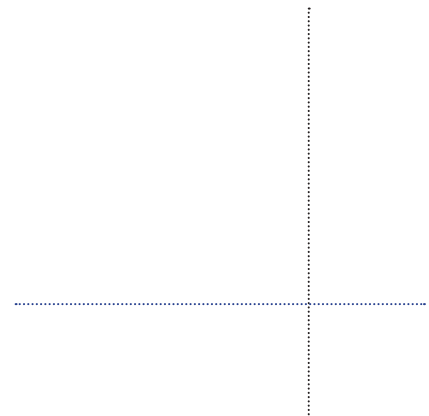


## **CAPITULO 4**

### **AGUA SUBTERRÁNEA, CALIDAD DEL AGUA Y ECOHIDROLOGÍA**

## **CHAPTER 4**

### **GROUNDWATER, WATER QUALITY AND ECOHYDROLOGY**





## CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS EN LA CUENCA URBANIZADA DEL RÍO “Quibú”, EN CIUDAD DE LA HABANA

### CONTAMINATION OF WATER IN THE URBANIZED BASIN OF THE “Quibú” RIVER, IN HAVANA CITY

*Proyecto CAESAR, IMCO-DEV, 2002-05, desarrollado por: Universidad de Munich, Universidad de La Habana, UAM de Madrid, UNAM de México*

JOSÉ EVELIO GUTIÉRREZ,  
MANUEL BOLLO,  
RAUL MARSÁN,  
ZOILA CASTAÑO,  
YORDAN PÉREZ  
Grupo de Hidrología y Cuencas  
Facultad de Geografía  
Universidad de La Habana UH  
Cuba  
E-mail: jevelio@geo.uh.cu

#### RESUMEN

*Se presenta un estudio del comportamiento espacio-temporal de la contaminación de las aguas fluviales en la cuenca urbanizada del río Quibú, situada en el sector occidental de la capital cubana, y sus causas de origen; también de aguas subterráneas y embalsadas. Se basó principalmente en el monitoreo y análisis quincenal de estas aguas en ocho puntos diferentes de la red hidrográfica -corriente principal y afluentes- durante los años 2003 y 2004, para el control de parámetros físico-químicos y en especial de algunos nutrientes (OD, pH, CE, Salinidad, EH, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> y SO<sub>4</sub>) a través de diferentes horas del día, para diferentes condiciones hidro-climáticas y dinámicas de flujo; y de un análisis más esporádico de los restantes tipos de fuente hídrica, anteriormente mencionados, en puntos complementarios (embalses, manantiales y aguas de pozo). Para la medición de esos parámetros se utilizaron un Multímetro Multi 340i/SET y un Expectro-Fotómetro PhotoLab S12, ambos marca WTW, alemanes, para trabajo de campo. También se utilizaron datos de la red de monitoreo permanente de la Empresa “Aguas de La Habana” referidos a DBO, DQO, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles y Sólidos Sedimentables. Con este trabajo se logró hacer un análisis y evaluación pormenorizados, del comportamiento espacial y temporal de la contaminación de las aguas de esta cuenca, y de los factores que contribuyen o dificultan el reestablecimiento de la calidad de las mismas. También se emiten algunas importantes sugerencias para resolver los actuales problemas hidrológico-ambientales existentes, que son de gran valor práctico.*

**Palabras clave:** *parámetros físico-químicos, carga contaminante, demanda de oxígeno, dilución, autodepuración, metanogénesis, problemas hidrológico-ambientales*

#### INTRODUCCIÓN

Hoy día es creciente y alarmante el impacto de la contaminación en las cuencas fluviales, especialmente urbanizadas, con repercusión directa en la calidad de sus aguas, reducción de la disponibilidad del recurso, degradación ambiental y riesgo sanitario para la comunidad residente. El origen de tal fenómeno es muchas veces multi-causal, a consecuencia de las diversas actividades económico-sociales, y su magnitud, también con frecuencia, sobrepasa la capacidad de auto-regeneración de los ríos afectados.

Esta temática es de interés especial para las autoridades institucionales y gubernamentales de las zonas metropolitanas correspondientes, dada la necesidad apremiante de su estudio y de su enfrentamiento eficaz.

La cuenca del río Quibú es una de las tres cuencas fluviales más contaminadas de territorio habanero y de todo el país, debido al incremento de la urbanización (50% de su superficie), y a otros factores de contaminación, históricos, no resueltos.

El presente estudio se basó fundamentalmente en el monitoreo y análisis físico-químico de las aguas del río principal y de sus afluentes (enero 2003–diciembre 2004), aguas embalsadas y subterráneas de la cuenca; del estudio del sistema hidrológico de la misma; del inventario, análisis y caracterización de los focos contaminantes y de la influencia antrópica en la degradación de la calidad de las aguas; de la evaluación de la magnitud de los parámetros analizados, acorde a las normas de calidad y de tolerancia de la contaminación hídrica establecidas en nuestro país. Paralelamente también se estudió el comportamiento y la posible influencia de la contaminación de los suelos en las aguas superficiales, principalmente vinculado al sector inferior de la cuenca (específicamente de metales pesados) pero por su limitada influencia no se incluirán tales datos en este artículo. Adicionalmente se concretan algunas reflexiones y se proponen recomendaciones acerca del manejo hidrológico-ambiental de la cuenca para contrarrestar la contaminación y los problemas hidro-sanitarios dentro de la misma, y contribuir a la sustentabilidad hidro-ambiental, que son de gran utilidad práctica y socio-ambiental.

## **CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y GEOGRÁFICA GENERAL DE LA CUENCA**

La Cuenca Quibú se encuentra en la porción occidental de la provincia Ciudad de La Habana, formando parte del sistema de pequeñas cuencas de su Llanura Norte, vertiendo hacia el Golfo de México.

Es pequeña (33,8 km<sup>2</sup>) y predominantemente llana (pendiente promedio de la cuenca 10m/km); La densidad media de su red de drenaje es de 1.04 km/km<sup>2</sup> (alto en el tercio superior y muy bajo en el tercio inferior); con elevados valores de temperatura, evaporabilidad, pluviosidad y estacionalidad hidrológica (la precipitación media anual es de 1495 mm, 73% de la cual cae en el período húmedo mayo-octubre). Es una cuenca fuertemente antropizada y urbanizada, con predominio de la actividad agrícola y la regulación fluvial en el sector superior; y de la actividad social e industrial en los sectores medio y bajo; con significativa modificación del régimen hidrológico, principalmente fluvial (el régimen de escurrimiento está enmascarado a causa de las aguas servidas que se incorporan en su mayoría a los ríos, procedentes de fuentes externas a la cuenca, e incrementan el caudal fluvial, y combinándose con el efecto de la regulación fluvial de las 5 presas existentes en la cuenca). En esta cuenca es apreciable la contaminación de sus aguas vinculada directamente al asentamiento poblacional y a la actividad industrial, con presencia de un acuífero cársico muy vulnerable a la contaminación, situado en la zona baja urbanizada de la cuenca.

### ***Tipos principales de suelo:***

- Sector superior de la cuenca: pardos carbonatados profundos y poco profundos; y fersialíticos.
- Sectores medio y bajo: ferralíticos rojos y húmicos siálicos
- Actividades productivas y de servicio, fundamentales:
- Actividad agrícola: Pastos, Caña de azúcar, Cultivos Varios
- Acuicultura (porción superior).
- Actividad industrial y agroindustrial: Industria azucarera (refinación de azúcar): CAI Manuel M. Prieto; Industria de materiales y de equipos de construcción; talleres de

maquinaria; industria farmacéutica; almacenes diversos (sectores medio e inferior, principalmente).

- Actividad de los servicios: Actividad comercial y de la gastronomía, y servicios asistenciales y hospitalarios (sectores medio e inferior).

#### **Utilización fundamental de los embalses:**

- “El Naranjito”: Reserva de agua para abasto de industria azucarera: CAI Manuel M. Prieto.
- “La Lisa”: Abasto industrial (industria azucarera: CAI Manuel M. Prieto; Objetivo: Sistema de Enfriamiento)
- “La Teresita”: riego agrícola
- “El Doctor”: Regulación de Avenidas y Saneamiento aguas debajo de la cuenca.
- “La Josefina”: Saneamiento: Dilución y remoción de los residuales que salen de la Laguna de Oxidación No.3 del CAI (forma parte del sistema de lagunaje, junto con las tres Lagunas de Oxidación Biológicas existentes).

## **REGULARIDADES DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO**

En esta cuenca existe una evidente contaminación de las aguas, fundamentalmente de sus cursos fluviales, ya que estos cuerpos de agua -los ríos- constituyen el receptor principal de aguas residuales (con y sin tratamiento previo) de gran parte de la zona urbanizada, especialmente la corriente principal, claramente visible en todo el tramo comprendido entre el barrio Los Pocitos hasta la desembocadura; es decir, unos 6 km de río. El curso del río Quibú, en todo ese tramo, presenta coloración gris o gris oscuro, alta presencia de basura de diferente índole, flotando o en el lecho y las márgenes del río, en numerosos lugares a lo largo de su trayectoria, lodos flotantes, alta turbidez, elevada fetidez, etc. (ver parámetros físico-químicos del tramo urbano del río).

En la contaminación de esta cuenca (y principalmente del río) se destacan fundamentalmente instalaciones relacionadas con la producción azucarera (CAI “Central Manuel Martínez Prieto”), Textilera Camilo Cienfuegos, la Planta de Oxígeno, Empresa Acuícola Acuabana, dedicada a la producción de alevines, entre otras, de todas las cuales existen referencias de diversos autores. También existen en el territorio pequeñas industrias dedicadas a la producción de fármacos (Centro de Biotecnología, Centro de Inmunoensayo, Centro de Genética, plantas de producción de vacunas, fábrica de PPG y el Centro Químico-Farmacéutico, entre otras).

Sin embargo, el volumen mayoritario de residuales que llegan a las corrientes fluviales de la cuenca, especialmente a su curso principal, es de “aguas albañales” procedentes de las viviendas del área urbana (que predominan); con las características típicas que posee este tipo de residual.

También en las áreas residenciales se producen vertimientos originados en las instalaciones del servicio público y comercial, insertos dentro de los propios barrios de esta comunidad.

En diversas partes del área residencial, situadas cerca del río, se producen descargas directas a este, sin ningún tratamiento; ni siquiera de tipo primario.

Los servicios asistenciales, policlínicos, bancos de sangre y hospitales generan por su actividad: sangre, materiales de cura, residuos de medicamentos, orina y materia fecal de los cuales parte de ellos van a parar al río debido a las irregularidades en el manejo de estos residuos, o su evacuación a través de la red de alcantarillado.

El vertimiento de basura, los llamados residuos sólidos urbanos (RSU) es otro de los contaminantes fuertes que tiene el río, pues se han establecido microvertederos en diversos sitios aledaños al



mismo, además de que se vierten directamente al río materiales de construcción, plásticos, pedazos de metales, bolsas de polietileno, cartones, animales muertos, residuos alimenticios, etc. (estos vertederos existen también en algunos puntos de la parte alta de la cuenca, fuera del área urbana).

En esta cuenca algunos de los vertimientos citados reciben tratamiento mediante lagunas de oxidación, o a través de una planta o estación de descontaminación de residuales (EDAR Quibú) localizada en el tramo bajo del río, vinculada a un pequeño sector donde se encuentra el Hospital Militar. Pero exceptuando esta última área, la mayoría de los desechos son vertidos a los cuerpos de agua sin tratamiento, generalmente a través de derrames cloacales (alcantarillado), que desembocan en el río.

En varios sectores de la cuenca, sobre todo en los más alejados del río (zonas 7 a la 10) no existe red de alcantarillado, sino fosas sépticas, que le dan tratamiento primario a los desechos (reduciendo su carga contaminante) y luego descargan el residual líquido al subsuelo, a través de un pozo de infiltración o absorción, como solución final, que no impactan directamente las aguas fluviales pero contaminan el acuífero Jaimanitas, en el sector correspondiente a esta cuenca.

*Tabla 1 - Valores medios de los parámetros físico-químicos de las aguas fluviales en diferentes puntos de monitoreo de la cuenca Quibú para el bienio 2003-04; en mg/l*

Punto	Lugar de referencia	C. E ( $\mu$ S/cm)	ph	O D	Amonio	Fosfato	Nitrato	Nitrito	Sulfato
P - 1	Palacio Convenciones	858	7,55	1,11	3,33	29,00	1,16	0,14	47,8
P - 2	Puente EDAR Quibú	863	7,63	1,08	5,38	19,70	0,90	0,11	45,3
P - 3	Reparto Los Pocitos	929	6,99	1,19	2,92	22,50	1,03	0,09	60,2
P - 4	Puente de la Autopista	1019	7,76	2,23	1,19	14,84	0,74	0,025	102,4
P - 5	Afluente sur oriental	983	7,87	5,20	1,11	13,63	0,60	0,009	57,2
P - 6	Salida presa El Doctor	931	7,92	4,04	2,90	14,22	0,67	0,052	91,3
P - 7	Arroyo Piscicultura	860	7,50	2,55	1,27	14,91	1,27	0,017	45,9
P - 8	Arroyo El Palmar	892	7,44	1,67	2,76	24,10	0,60	0,04	121,4

A partir de los datos expuestos, se aprecia que las aguas de río presentan la mayor contaminación hídrica en la cuenca, y un carácter crítico, debido al factor mencionado (Gutiérrez, J.E. 2004). Los embalses presentan valores mucho más bajos en sus indicadores de contaminación, al comparárseles con las aguas fluviales, sobre todo de los tramos bajos. Las aguas subterráneas también presentan tenores muy inferiores comparativamente (Gutiérrez, J.E. 2004).

En los embalses el O.D. es superior, las aguas son más alcalinas, y son mucho más bajos los contenidos de nitrito, nitrato y amonio, al comparárseles con las aguas fluviales de la zona urbana.

Las aguas subterráneas, por su parte, presentan valores mucho mayores de O.D. que el que presentan los ríos y los embalses; tenores menores de nitrito que los ríos (especialmente al contrastarse con la zona urbana); aunque presentan valores mucho mayores de nitratos, lo cual es característico de las fuentes subterráneas, aunque también es indicativo, en parte, de contaminación orgánica. O sea, que los embalses, con excepción de la Josefita que es utilizada para saneamiento, son las fuentes hídricas menos contaminadas dentro de la cuenca, en sentido general, y los ríos, especialmente los que atraviesan las áreas urbanizadas, los más contaminados.

Tabla 2 - Valores medios de los parámetros físico-químicos de las aguas fluviales en diferentes zonas y áreas de la cuenca Quibú para el bienio 2003-04; en mg/l

Zona	Referencia	C. E ( $\mu\text{S/cm}$ )	ph	OD	Amonio	Fosfato	Nitrato	Nitrito	Sulfato
Z - 1	Subcuenca Suroccidental	895	7,71	3,30	2,09	14,60	0,97	0,035	68,6
Z - 2	Subcuenca Suroriental	983	7,87	3,20	1,11	13,63	0,60	0,009	57,2
Z-1+2	Entrada a la zona urbana (sin Z-3)	1019	7,76	2,23	1,19	14,84	0,74	0,025	102,4
Z - 3	Subcuenca extremo oriental	994	6,60	1,34	2,44	35,40	1,58	0,034	88,7
Z - 4	Tramo urbano (val.medio)	885	7,39	1,13	3,87	23,70	1,03	0,110	51,1
Z - 4	Salida de la zona urbana	858	7,55	1,11	3,33	29,0	1,16	0,140	47,8

Elaboradas por los autores, mediante monitoreo directo.

Tabla 3 - Valores medios de algunos parámetros de contaminación del agua del tramo bajo del río Quibú, en varios puntos de la zona urbana (trienio 2001-2003), en mg/l

Localización de los puntos (calles intercepción)	DBO <sub>5</sub>	DQO	O. Disuelto
25 y 124	62,0	180	2,79
17 y 146	80,8	110	2,43
5ta Avenida	123,8	80	2,53

Elaborada por los autores - Fuente: EDAR Quibú (Empresa Aguas de La Habana)

Tabla 4 - Valores medios de parámetros físico-químicos de los embalses, para el bienio 2003-2004; en mg/l

Embalse	Ph	O.D.	C.E.	Amonio	Nitrito	Nitrato	Fosfato	Sulfato
El Naranjito	7.93	8.62	903	0.72	0.013	1.40	28.72	159.3
La Lisa	7.61	2.54	903	0.91	0.017	0.31	24.6	113.9
La Teresita	7.03	3.57	467	1.06	0.008	0.30	43.1	37.3
El Doctor	7.89	4.29	913	0.86	0.011	0.26	26.3	53.0

Elaborada por los autores mediante monitoreo directo. No se incluye el embalse La Josefita, por su uso hidro-sanitario

Tabla 5 - Valores medios de parámetros físico-químicos de algunos puntos de muestreo de las aguas subterránea de la cuenca, durante el 2004. (valores en mg/l; conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Puntos	ph	O. D.	C.E.	Amonio	Nitrito	Nitrato	Fosfato	Sulfato
M 21	7.74	10.8	4000	0.84	0.02	0.3	6.1	325
M 22	7.00	24.7	974	0.6	0.02	0.5	4.8	50
P 31	6.94	25.7	1016	1.59	0.01	4.4	3.1	154
P 32	7.24	22.7	890	0.7	0.01	2.1	3.4	112
P 33	7.22	24.7	1490	0.47	0.02	2.7	4.1	206
P 34	7.2	25.2	898	0.45	0.02	1.3	5.4	63

Elaborada por los autores mediante monitoreo directo: M-manantial P-pozo

Comparando, por su parte, los parámetros observados en los ríos de las diferentes zonas, se aprecia que los valores peores corresponden al tramo urbano, como ya se planteó, y principalmente a la salida o parte baja de la zona urbana, con los valores más altos de nitrito, nitrato, amonio, fosfato, DBO y DQO; y los más bajos de Oxígeno Disuelto; algunos de ellos incluso, como la DBO, la DQO, y los fosfatos, sobrepasan las normas establecidas para este tipo de fuente hídrica por la Norma Cubana NC-27-1999. Debe resaltarse que las concentraciones elevadas de iones nitrito y amonio, son reflejo de la existencia de contaminación orgánica reciente, de carácter peligroso. La zona 3 le sigue en orden desfavorable, debido a las características del residual del CAI, y al estado crítico de las lagunas.

Los principales factores de la contaminación fluvial, en orden de magnitud, son:

- Aguas albañales sin previo tratamiento, procedentes de áreas próximas a los ríos.
- Residuales industriales que se conducen hasta las corrientes fluviales (fundamentalmente a través de la red de alcantarillado), con y sin tratamiento previo (se destaca la industria azucarera CAI M. M. Prieto, situado en la subcuenca nororiental de la cuenca, en la zona no urbanizada o poco urbanizada de la cuenca, aguas arriba de la autopista).
- Vertimiento de basura en márgenes y cauces de ríos, principalmente en la zona urbanizada.
- Aguas albañales con tratamiento primario (fosas y tanques sépticos) procedentes de gran parte de la zona urbanizada de la cuenca, dotada de alcantarillado pero conducida por éste hasta los cauces fluviales.

Por otro lado, además, debe resaltarse que la naturaleza predominante de la contaminación en el territorio es de tipo orgánica, debido a que la mayoría de los contaminantes tienen precisamente este carácter, por constituirse de residuales domésticos (aguas albañales) y de residuales de fábricas e industrias con predominio de elementos orgánicos, situados fundamentalmente en los sectores medio e inferior de cuenca.

Como se observa en los datos, en los dos últimos sectores mencionados las aguas del río presentan los valores más elevados de amonio, fosfato y DBO, y los valores más bajos de OD; también en comparación con las demás fuentes y cuerpos de agua de la cuenca (Gutiérrez, J.E. 2004).

## REGULARIDADES ESPACIALES DE LA CONTAMINACIÓN FLUVIAL

El estado más crítico de la contaminación en las aguas fluviales de esta cuenca se halla en el tramo bajo, donde se concentran y concurren la mayor parte de los focos contaminantes y vertimientos de residuales líquidos y sólidos que afectan las aguas, que representan una altísima carga contaminante distribuida en un corto tramo de recorrido del río. En los puntos más bajos 1, 2 y 3, correspondientes

al tramo mencionado, se aprecia que las características organolépticas son extremadamente malas, se produce gran arrastre de residuos sólidos de muy variada procedencia, el color del agua es pardo-negruzco, existe gran cantidad de lodos flotantes, desprendimientos de gases y fetidez, etc. También se advierte presencia ocasionalmente abundante de grasas, detergentes y residuos de hidrocarburos.

Al hacer un diagnóstico resumen de los parámetros de contaminación evaluados, se aprecia así mismo que en los puntos referidos se dan las concentraciones más altas de NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, DQO, DBO, Sólidos Sedimentables y Sólidos Totales; los valores más bajos de Oxígeno Disuelto; y los niveles más elevados de materia flotante. Todo ello indica que la calidad del agua en este río es muy mala, estando altamente contaminado. Algunos de los parámetros mencionados sobrepasan de manera frecuente o permanente, los valores máximos permisibles para ellos (ver Norma Cubana NC27:1999), como el DBO5 que muchas veces se encuentra sobre 40 mg/l, el DQO que frecuentemente sobrepasa los 90 mg/l, la materia flotante que siempre es elevada, el fosfato promedio se encuentra por encima de 4 mg/l, y el nitrógeno total alcanza valores entre 7 y 10 mg/l con frecuencia, en los puntos bajos.

Las aguas fluviales presentan el mayor grado de contaminación precisamente en los sectores medio y bajo (también las aguas subterráneas, aunque en menor magnitud), justamente donde se concentra el grueso de su población, por prevalecer en ellos los principales emisores de contaminación albañal e industrial; como ya se ha argumentado.

En el sector o tercio superior presentan índices más bajos de contaminación, pero también se manifiesta en determinado grado. A su vez se evidencia diferencia en las características de la contaminación entre un afluente y otro del mismo. El afluente de la subcuenca suroriental está afectado básicamente por los residuales del Central (CAI); el del la subcuenca suroccidental por la actividad acuícola y agrícola (fertilizantes orgánicos); en menor medida por residuos industriales; mientras la subcuenca central por residuales orgánicos de la comunidad rural y de la actividad agrícola.

*Tabla 6 - Análisis del residual de salida de las lagunas de oxidación del CAI, hacia el río.*

Fecha	pH	DQO mg/l	DBO <sub>5</sub> mg/l	C. Eléctrica μS/cm
28.05.2002	3.74	13834	12589	1452
29.05.2002	3.77	14135	13013	1552
05.05.2002	3.67	13533	11822	1536
18.06.2002	3.60	11151	10356	1410
19.06.2002	3.91	11355	10604	1390

*Fuente: Facultad de Ingeniería Química del ISPJAE.*

Estos datos, observados en diferentes fechas, tomadas al azar por sus autores dos años atrás -las condiciones se mantienen-, ilustran el comportamiento extremo de los indicadores de contaminación: El pH es extremadamente bajo, lo que indica el carácter extremadamente ácido de los residuales, y los demás considerablemente altos, especialmente la DBO y la DQO, en correspondencia con la significativa carga contaminante que los caracteriza. También reflejan que las lagunas están trabajando de forma anaerobia por su valor de pH de salida (cerca de 3.7 como promedio); y que al parecer, se encuentran en fase ácida y única, no completándose el proceso de tratamiento con la fase metanogénica, lo que es indicativo de que los tiempos de retención son bajos para la carga que está llegando a la misma. Esto se debe a que en las lagunas se han acumulado sólidos en sus fondos, con los años de trabajo, y se han reducido los volúmenes con respecto a los de diseño.

Por otro lado, en la salida de la empresa piscícola "Acuabana", así como en la presa El Doctor receptora de los residuales de esta última, ambas pertenecientes a la subcuenca suroccidental, los valores de sulfatos son elevados (> 100 mg/l), lo que al parecer responde a una causa ajena a la

influencia de la actividad acuícola. Estas concentraciones influyen en los tenores de este elemento aguas abajo, que siguen siendo significativos pero menores.

## **REGULARIDADES TEMPORALES DE LA CONTAMINACIÓN FLUVIAL**

La variabilidad temporal más significativa de la contaminación fluvial (que es el objeto hídrico que presenta la contaminación más crítica e importante en la cuenca) es de carácter estacional, incrementándose en el período seco y disminuyendo en el período lluvioso por efecto de la dilución, al aumentar los caudales; excepto los fosfatos y nitritos, por causas especiales (más adelante se explica). Sin embargo aumentan los restantes nutrientes, como el amonio y el nitrato y la demanda de oxígeno en agua; también los sulfatos; el Oxígeno Disuelto, en consecuencia, disminuye. En el artículo sobre evaluación y diagnóstico de la contaminación en la cuenca Quibú, de estos propios autores, se ofrecen datos específicos de cada parámetro físico-químico, se explican en detalle las causas particulares de la variación temporal de cada uno, y se representan gráficamente tales variaciones (ver Gutiérrez, J.E. 2005).

## **CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES**

Las aguas fluviales de esta cuenca presentan elevada contaminación, de tipo orgánica principalmente, especialmente en el sector bajo (puntos 1, 2 y 3), debido al impacto provocado en esta área por la concentración poblacional y el vertimiento indiscriminado de residuales domésticos e industriales sin tratamiento, hacia las corrientes de agua.

Es destacable la fuerte y sostenida influencia que ejercen también los residuales del central en la contaminación del río principal, generados al sureste de la misma a partir del punto 3, por el significativo aporte de residuales de origen orgánico e inorgánicos emitidos, como se aprecia en los datos de DBQ, DQO, y pH reportados. Los puntos 1 y 2 presentan la situación más crítica a lo largo del perfil del río, registrando las concentraciones más altas de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ , DBO, DQO, Sólidos Sedimentables y Sólidos Totales; los valores más bajos de Oxígeno Disuelto; y niveles elevados de materia flotante, que denotan el elevado deterioro de la calidad del agua en este río: la misma está altamente contaminada.

La conductividad eléctrica en el tramo bajo (puntos 1 y 2) resulta la más baja a lo largo del río, con valores medios por debajo de 870 MS/cm. Esto responde a la baja mineralización de las aguas albañales, debido a que la fuente de suministro de agua potable de la población residente procede de cuencas subterráneas externas a la cuenca Quibú, que se caracterizan por tener aguas muy dulces.

La corriente tributaria más contaminada del conjunto que descargan a la corriente principal del sistema fluvial, es el afluente sur-oriental, por ser el receptor directo del central azucarero CAI, que se convierte a su vez en uno de los principales factores de impacto de la contaminación del río Quibú. En ese afluente y en todo el tramo urbanizado debe ponerse el énfasis principal de rehabilitación de las aguas fluviales de la cuenca.

El proceso de Autodepuración del río Quibú no logra producirse debido a la combinación de varios factores que contrarrestan su desarrollo, como la elevada carga contaminante y composición agresiva de los residuales, los vertimientos continuados de estos a todo lo largo del tramo urbanizado, la corta longitud del mismo, su poco caudal, y su baja pendiente. Esto se corrobora por los bajos valores de O.D. y los altos valores de DBO y DQO que presenta.

A pesar de que en esta cuenca se efectuaron un conjunto de acciones en las últimas cuatro décadas, especialmente en su sector superior, encaminadas al aprovechamiento de sus recursos hídricos, al control de avenidas, y al saneamiento, principalmente, así como la construcción de obras de acueducto, alcantarillado y órganos de tratamiento en el resto de la cuenca; aún es insuficiente la obra realizada, y se han generado nuevos problemas, debido fundamentalmente al: impacto del crecimiento social ocurrido en la cuenca; incremento de instalaciones industriales y asistenciales

contaminadoras; envejecimiento y precariedad de algunas instalaciones claves de tratamiento de aguas residuales como las Lagunas de Oxidación del M. Prieto; asentamiento poblacional descontrolado e inadecuado en las márgenes del río, y algunos problemas de indisciplina social vinculados con el vertimiento de basura próximo al río, en su cauce y en otros lugares del territorio.

Debe continuarse realizando el monitoreo y evaluación de la contaminación en la cuenca, como base para un estudio sólidamente sustentado de Evaluación de Impacto Ambiental y para la argumentación de un Plan detallado de Acción.

Es necesario instalar urgentemente la compuerta de la obra de toma de la presa El Doctor, para que cumpla mejor su cometido de control del Gasto Sanitario y de Avenidas durante los días con abundantes lluvia y gastos máximos, garantizando de mejor manera estas funciones operativas.

Es aconsejable la instalación de un mayor número de Tanques Sépticos y otros órganos de tratamiento de residuales (Lagunas de Estabilización) de manera adicional, que reduzcan la carga contaminante de los albañales que se vierten al río en forma cruda. La ubicación y atención de estos últimos, sin embargo, deben ser bien planificados.

Debe repararse y terminarse de ampliar la capacidad prevista de la EDAR Quibú (se proyecta duplicar su capacidad hasta 300 l/s, pero aún no se ha hecho).

Es imperativo la reconstrucción de las Lagunas de Estabilización del CAI, tal y como se hizo recientemente con la de Versailles.

Debe acometerse un estudio y un diagnóstico especializado de los principales Focos Contaminantes reportados en la cuenca, y emitirse las medidas de solución técnica y jurídicas requeridas al efecto.

Teniendo en cuenta el porcentaje de área urbana existente en esta cuenca correspondiente a tres municipios de la capital habanera, el grado de vulnerabilidad a las inundaciones y a la contaminación hídrica de la misma, y la contaminación severa y el estado hidrológico sanitario crítico de los ríos y márgenes de los sectores bajo y medio de la cuenca, es necesario desarrollar y poner en práctica inmediata un Plan de Manejo Integral de la Cuenca, con énfasis en el Manejo de las Aguas y en la Contaminación Hídrica, que revierta la situación medioambiental actual, el cual debe ser acometido por el "Consejo de la cuenca Quibú".

## REFERENCIAS

1. GUTIÉRREZ, JOSÉ E. 2004. Análisis y evaluación hidrológico-geográfica del abasto de agua a la Ciudad de La Habana Taller científico binacional México-Cuba sobre la problemática del abasto de agua a grandes ciudades. Los casos de Ciudad México y Ciudad Habana. 18p. (Libro de Memorias).
2. GUTIÉRREZ, JOSÉ E. 2005. Gestión Integral de las Aguas en Zonas Urbanas. Ejemplo de caso: cuenca hidrográfica del río Quibú, de Ciudad de La Habana. Taller Científico Internacional de Desarrollo Regional y Local. Universidad de La Habana, Cuba. 22p. Publicación Digital.

# PATRONES, PROCESOS Y ORIGEN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EL SISTEMA DE FLUJOS DE LA SIERRA DEL ROSARIO

## *PATTERNS, PROCESSES AND ORIGIN OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE FLUX SYSTEM FROM SIERRA DEL ROSARIO*

M. RODRÍGUEZ PIÑA

*Centro de Estudios de Medio Ambiente (Cuba)*

J. R. FAGUNDO CASTILLO

P. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

*Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (Cuba)*

J. CARRILLO RIVERA

*Instituto de Geografía de la UNAM (México)*

I. ANTIGÜEDAD AUZMENDI

*Universidad del País Vasco (España)*

A. ABRAHAM ALONSO

*Instituto de Geografía Tropical*

M. SUÁREZ MUÑOZ

C. MELIÁN RODRÍGUEZ

*Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (Cuba)*

### **RESUMEN**

*La Sierra del Rosario presenta un sistema de flujos de carácter local, intermedio y regional que interactúa con sedimentos de diferente naturaleza (carbonatos, areniscas y rocas ultrabásicas), cuya composición química está controlada por las características geológicas e hidrogeológicas de la región. En este trabajo se estudian los patrones hidrogeoquímicos de los diferentes flujos y los procesos geoquímicos que explican la composición de los diferentes tipos de agua.*

**Palabras clave:** *composición química, sistema de flujos, sierra del Rosario*

### **INTRODUCCIÓN**

En la Sierra del Rosario existen condiciones geológicas de carácter litológico (presencia de rocas carbonatadas, esquistos y areniscas, roca ultrabásicas) y estructural (fallas, escamas tectónicas, planos de estratificación) muy complejas, que establecen condiciones hidrogeológicas favorables para la ocurrencia de flujos de diferente naturaleza: locales, intermedios y de carácter más regional y profundo, todo lo cual determina que las aguas que discurren por los macizos y emergen en manantiales y surgencias o son captadas en pozos, posean diferente composición desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo. La identificación de este sistema de flujos y su composición acorde a las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales locales, constituye el punto de partida para su integración óptima en los planes de desarrollo socio-económico de la región. En trabajos previos se discuten los resultados de la caracterización hidrogeoquímica del sistema de flujos de la Sierra del Rosario, mediante la aplicación de modelos de tipo termodinámico (Fagundo *et al.*, 2004 a; 2005 a; Rodríguez-Piña *et al.*, 2005) y cinético (Fagundo *et al.*, 2004 b). El objetivo de este trabajo es determinar los patrones hidrogeoquímicos correspondientes a los diferentes tipos de flujos que drenan las litologías presentes en este territorio; así como los procesos hidrogeoquímicos que explican la composición química de dichas aguas.

## Localización, geología e hidrogeología del área de estudio

La parte central del área de estudio se encuentra localizada aproximadamente a 100 km del sudoeste de la Ciudad de La Habana (Figura 1) y ocupa una superficie de 1 125 km<sup>2</sup>. Las características geológicas de la Sierra del Rosario son una consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio (Pszczzoikowski, 1978; Academia de Ciencias, 1988).

En el área se aprecian tres unidades fisiográficas principales paralelas e intercaladas entre sí, constituidas por calizas, esquistos - areniscas y rocas ultrabásicas, las cuales están limitadas al norte y al sur por las fallas Bahía Honda y Pinar respectivamente (Figura 2).

Las características generales de las unidades geológicas que afloran en el área se describen en la tabla 1.

Debido a la prevalencia del relieve cársico en la región, la infiltración de las precipitaciones a través de los macizos es instantánea y de carácter gravitatorio.



Figura 1 - Esquema de ubicación de la Sierra del Rosario.

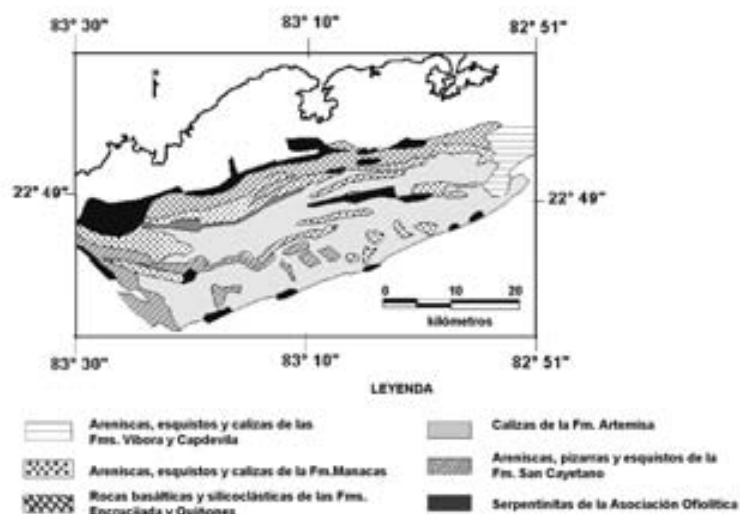


Figura 2 - Esquema geológico con perfiles seleccionados para el estudio de la relación existente entre los patrones hidrogeoquímicos y la disposición de las secuencias estratigráficas de la Sierra del Rosario.



Tabla 1 - Principales formaciones geológicas de la Sierra de Rosario y su litología

Símbolo	Edad	Formación	Litología
P1-2	Paleógeno (Eoceno indiferenciado)	Fm. Manacas	Areniscas, esquistos, calizas, pedernales y olistostromas
K2m	Cretácico superior	Fm. Cacarajicara	Brechas, calcarenitas, calcilutitas
K1-2 al-cm	Cretácico inferior -superior	Fm. Guajaibón	Calizas masivas, calcarenitas, biomicriticas a veces dolomitizadas.
K1-2	Cretácico inferior.-superior indiferenciado.	Fm. Sierra Azul	Calizas, calizas margosas, argilitas, silicitas
	Terrigeno -Carbonatado.	Fm. Martín Mesa	Calizas masivas y estratificados (biomicritas), calcarenitas,
K1b-bm	Cretácico inferior	Fm. Lucas	Calizas (biomicritas) estratificadas, argilitas calcáreas.
J3 -K1 b	Jurásico superior - Cretácico inferior	Fm. Artemisa	Calizas estratificadas (micritas, biomicritas, calcilutitas y calcarenitas) con intercalaciones de silicitas en la parte superior.
J1-J3 ox	Jurásico inferior - superior	Fm. San Cayetano	Areniscas, lutitas, argelitas, esquistos

#### ASOCIACION OFIOLÍTICA MESOZOICA

σ			Serpentinitas, harzburguitas, Iherzolitas, wherlitas, dunitas serpentinizadas
---	--	--	-------------------------------------------------------------------------------

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron 376 datos hidroquímicos, a partir de muestreos realizados entre los años 1984 y 2004 (Pulina y Fagundo, 1984; Franco, Fagundo y Pajón, 1987; Peláez *et al.*, 1990; Fagundo *et al.*, 1993; González *et al.*, 2000), compilados en la base de datos TERMADAT (Fagundo-Sierra *et al.*, 2002). En la Tabla 2 se presenta de forma resumida el inventario de puntos de agua. En dicha Tabla, los datos aparecen agrupados por formación geológica, o lo que es lo mismo, por litología o tipo de roca drenada or las aguas de lluvia.

Las correspondientes mediciones de los parámetros físicos y químicos se realizaron en el campo, las más recientes mediante pHmetro, medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI8424, marca HANNA y oxímetro modelo HI-914, marca HANNA. Los contenidos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, así como la alcalinidad total (HCO<sub>3</sub> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) fueron también determinados "in situ", mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>) se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomadas las muestras, utilizando métodos volumétrico siguiendo las recomendaciones del Standard Methods for the Examination of Wastewater (APHA; AWWA; WPCF; 1989), adaptadas para condiciones de campo (Krawczyk, 1992). En el caso de los cationes (Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>), se empleó también la espectrofotometría de absorción atómica, con llama de aire-acetileno (espectrofotómetro de llamas de la firma PIE UNICAM). La calidad de los datos fue validada mediante dos métodos: balance de aniones y cationes y diferencia entre conductividad eléctrica real y teórica.

Los datos hidroquímicos fueron procesados mediante los programas de computación HIDROGEOQUIM (Fagundo *et al.*, 2005 b) y MODELAGUA (Fagundo-Sierra *et al.*, 2001). Se utiliza además un algoritmo complementario para determinar los procesos geoquímicos que se producen en los casos en que los flujos interactúan con dos o más litologías portadoras del mismo catión (Mg<sup>2+</sup> originado por disolución de dolomita o intemperismo de serpentinita, Ca<sup>2+</sup> originado por disolución de calcita y anorthita). Mediante este algoritmo se determinó la composición de las plagioclasas en

términos de albita y anorthita (Rodríguez-Piña, 2005). Los datos hidroquímicos son expresados y representados mediante patrones hidrogeoquímicos (Fagundo, 1998).

Tabla 2 - Resumen del inventario de puntos de agua de la Sierra del Rosario.

Grupo	Formación geológica	Litología	Sub grupo	Flujo	Recorrido	Captación	Muestra	N	SST
0						Lluvia	0	4	24
1	Asociación Ofiolítica	Serpentinitas		FL	Corto	Arroyos	5-9	17	329
2	Fm. Manacas	Esquistos, areniscas y calizas	1	FL	Corto	Arroyos y pozos	1-2	5	133
			2	FL	Medio	Arroyos y manantiales	3-4	31	412
3	Fm. San Cayetano	Esquistos y areniscas	1	FL	Corto	Pozo	53	1	345
			2	FI	Medio	Manantiales y pozos	54-56	11	1336
4	Fm. Guajaibón	Calizas masivas	1	FL	Corto	Cuevas	10-13	21	240
			2	FL	Corto	Manantiales	14-18	14	366
			3	FL	Corto	Surgencias y resurgencias	19-23	94	298
5	Fms. Sierra Azul, Lucas y Cacarajicara	Calizas estratificadas, clacilutitas y calcarenitas	1	FL	Corto	Manantial	24-27	6	424
			2	FI	Medio	Manantial	28	2	625
6	Fm. Artemisa	Calizas estratificadas	1	FL	Corto	Manantiales y pozos	29-40, 30A	37	482
			2	FL	Corto	Resurgencias	41-42	5	306
			3	FI	Medio	Manantiales y pozos	43-47	28	622
7	Fm. Artemisa y otras litologías	Calizas y mezcla de otras litologías		FI	Medio	Manantiales y pozos	48-52	9	715
8	Fm. Artemisa (drenaje profundo y de mayor recorrido)	Calizas, esquistos y areniscas y rocas ultrabásicas	1	FR	Largo y profundo	Manantiales y pozos	57-67	84	2245
			2	FR	Variado en profundidad	Manantiales y pozos	68-72	5	1859

Fm: Formación FL: Flujos locales, FI: Flujos intermedios, FR: Flujos regionales.

## RESULTADOS

En la Figura 3 se presentan los patrones hidrogeoquímicos, representados mediante diagramas de Stiff, de los diferentes flujos que drenan la Sierra del Rosario.

Las aguas de los flujos locales que drenan las rocas ultrabásicas (Figura 3, 1) son del tipo  $\text{HCO}_3\text{Mg}$  y su patrón medio es 118-181. Los principales procesos geoquímicos que explican la composición

de los flujos de carácter local son: disolución de serpentinita y en menor medida disolución de halita, oxidación de pirita e intemperismo de plagioclasas (Tabla 3).

Las aguas de los flujos locales de corto y mediano recorrido que drenan los sedimentos de la Formación Manacas, son del tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$ , con patrones hidrogeoquímicos 451-271 (Figura 3, 2) y 352-181 respectivamente. Los principales procesos geoquímicos son: disolución de calcita y dolomita, así como intemperismo de plagioclasa y serpentinita a expensas de  $\text{CO}_2$  de carácter biogénico (Tabla 3). También contribuyen al origen de la composición química de estas aguas la disolución de halita, el intemperismo de microclino y la oxidación de pirita.

Las aguas de los flujos locales e intermedios que discurren por sedimentos de la Formación San Cayetano son del tipo  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  y  $\text{HCO}_3>\text{Cl-Na}$ . Poseen patrones hidrogeoquímicos 811-172 (Figura 3, 3) y 811-271 respectivamente y su composición se explica mediante procesos geoquímicos de disolución incongruente de plagioclasa con el aporte iónico de los procesos de disolución de halita, de intemperismo de microclino y serpentinita, y de la oxidación de pirita (Tabla 3). La composición de la plagioclasa, en términos de albita y anorthita, es:  $\text{Na}0.9\text{Ca}0.1\text{Al}1.1\text{Si}2.9\text{O}8$  (Tabla 4).

Los flujos locales e intermedios que drenan carbonatos de las formaciones Guajaibón, Sierra Azul, Lucas y Artemisa son del tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , con patrones hidrogeoquímicos: 271-181 (Figura 3, 5), 181-172, 181-271 y 271-181 (Figura 3, 6). Las aguas que interactúan con los sedimentos de la Formación Cacarajicara son de tipo mixto ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Na}$ ) y poseen patrón hidrogeoquímico 361-172 (Figura 3, 4). Los principales procesos geoquímicos son: disolución de calcita y dolomita, consumo de  $\text{CO}_2$  en la zona del suelo, seguidos de disolución de halita, transferencia de plagioclasa – caolinita y oxidación de pirita (Tabla 3).

La composición química de los flujos locales que drenan las calizas estratificadas de la Formación Artemisa, también de tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  (patrón 181-181), tiene su origen mediante procesos geoquímicos similares al de las restantes aguas carbonatadas. Los flujos intermedios de esta litología se caracterizan por la presencia de  $\text{H}_2\text{S}$  y su composición y patrón hidrogeoquímico son similares al de los flujos locales. Además de la disolución de calcita y dolomita ocurren procesos de disolución de halita y oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato (Tabla 3).

Las aguas correspondientes a los flujos que drenan la Formación Artemisa con interacción con otras litologías (areniscas y rocas ultrabásicas) son bicarbonatadas mixtas ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}>\text{Mg}>\text{Na}$ ) y su patrón principal es 352-181 (Figura 3, 7). La composición química de esta agua se explica mediante procesos de disolución de calcita, dolomita, serpentinita e intemperismo de plagioclasa, acompañados de oxidación de pirita con reducción parcial de sulfato (Tabla 3).

Las aguas de mayor y profundo recorrido subterráneo son fundamentalmente  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  con patrones 271-118 y 181-118 (Figura 3). La composición química de estas aguas altamente mineralizadas se puede explicar, al igual que en el caso anterior, mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita, dolomita y serpentinita, disolución incongruente de plagioclasa y microclino, así como oxidación de pirita y reducción de sulfato (Tabla 3). La magnitud de las masas disueltas o transferidas es elevada, especialmente producidas por disolución de calcita a expensas del  $\text{CO}_2$  generado en el proceso de oxidación de pirita. En general, en las muestras estudiadas priman las aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas, cuya composición se relaciona con los carbonatos de las formaciones Guajaibón y Artemisa. Con relación a la mineralización, son más abundantes las aguas que presentan una cantidad moderada de minerales disueltos.

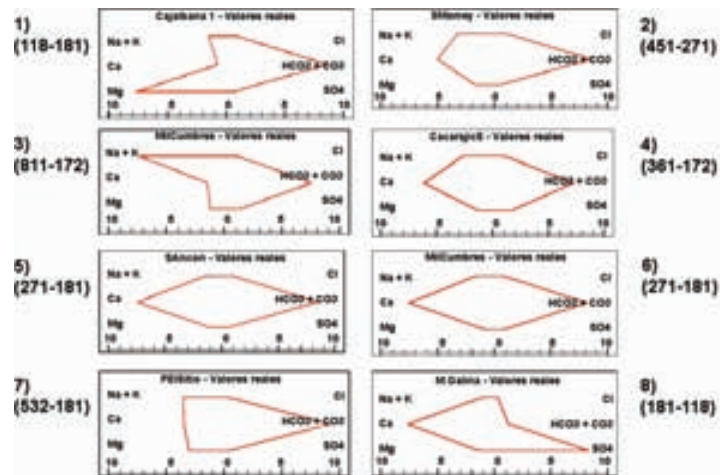


Figura 3 - Patrones hidrogeoquímicos representados mediante diagramas de Stiff de los valores medios de los flujos de la Sierra del Rosario: 1) Flujos locales que drenan rocas ultrabásicas ( $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ ); 2) Flujos locales que drenan esquistos, areniscas y calizas de la Fm. Manacas. ( $\text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Na}$ ); 3) Flujos intermedios que drenan esquistos y areniscas de la Fm San Cayetano. ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ); 4) Flujos intermedios que drenan sedimentos de la Fm. Cacarájicara ( $\text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Na}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ); 5) Flujos locales que drenan calizas de la Fm. Guajaibón ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ); 6) Flujos locales que drenan calizas de la Fm. Artemisa ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ); 7) Flujos intermedios que drenan diferentes litologías ( $\text{HCO}_3\text{-Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$ ); 8) Flujos regionales que drenan calizas de la Fm. Artemisa e interactúan con otras litologías ( $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). Las concentraciones son expresadas en tanto por 10 de aniones y cationes.

## CONCLUSIONES

Las propiedades químico-físicas de los flujos que drenan la Sierra del Rosario dependen de las interacciones agua-roca durante el tiempo de contacto que media desde la infiltración hasta su emergencia y de la constitución de los materiales acuíferos. Es posible caracterizar los diferentes flujos (locales, intermedios y regionales) sobre la base de un grupo de indicadores geoquímicos.

La composición química de estas aguas responde a esa complejidad litológica y estructural y puede expresarse en términos de patrones hidrogeoquímicos. La misma depende de la litología, las características de la tectónica local, el tipo de flujo, el régimen de lluvia y en menor escala de los efectos antrópicos. Las principales facies hidroquímicas son: bicarbonatadas cálcicas (carbonatos), bicarbonatadas sódicas (esquistos y areniscas), bicarbonatadas magnésicas (rocas ultrabásicas) y bicarbonatadas mixtas (mezcla de litologías) en acuíferos drenados por flujos locales e intermedios; sulfatadas cálcicas, sulfatadas bicarbonatadas cálcicas y cálcicas sódicas en acuíferos libres o confinados drenados por flujos regionales. Mientras que la mineralización y el contenido de gases disueltos son menores en los flujos locales, en los de tipo intermedio y regional, la mineralización es superior, con relativamente elevados contenidos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  disueltos. En los acuíferos someros y de pequeño recorrido (flujos locales), constituidos por carbonatos de las formaciones Guajaibón, Sierra Azul y Artemisa, los principales procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química de las aguas (del tipo  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ) son la disolución de calcita y dolomita; en los acuíferos constituidos por rocas ultrabásicas (Asociación Ofiolítica), el intemperismo origina aguas  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$  cuyo origen se explica mediante la disolución de serpentinita; mientras que aquellos acuíferos compuestos de esquistos y areniscas producen por intemperismo aguas  $\text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Na}$  (Formación Manacas),  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  y  $\text{HCO}_3 > \text{Cl-Na}$  (Formación San Cayetano), cuya composición se explica mediante procesos de disolución incongruente de plagioclasas. En todos los casos el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  en las aguas se debe a la oxidación de pirita, el cual es mayor en los esquistos y areniscas. En los acuíferos más profundos y de extenso recorrido (flujos regionales), la composición química de las aguas de mayor mineralización originadas ( $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ), se explica mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa, oxidación de pirita con reducción de sulfato con mayores valores de transferencia de masa que los restantes flujos.

Tabla 3 - Transferencia de masa mg/l y en (%) originada por disolución o reacción química (+) o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción lluvia - roca en la Sierra del Rosario.

Proceso geoquímico	5	1	3	53	54	10	14	20	24	28	30	41	43	51	52	59	60
Halita	20.0 (7.2)	12.4 (13.6)	25.9 (7.5)	18.7 (3.5)	85.9 (5.7)	16.7 (13.0)	8.8 (6.1)	16.0 (8.2)	14.0 (6.7)	40.6 (5.8)	18.5 (5.7)	13.5 (6.6)	35.1 (4.7)	27.4 (5.2)	31.6 (1.8)	47.2 (2.5)	50.0 (1.9)
Calcita	15.3 (5.5)	15.0 (16.5)	85.2 (24.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	76.3 (59.5)	103.3 (71.9)	125.6 (64.5)	137.0 (65.8)	200.5 (28.5)	191.6 (58.8)	134.8 (65.7)	264.0 (37.8)	148.3 (28.3)	191.3 (11.1)	868.8 (36.1)	1054.1 (40.3)
Dolomita	0.0 (0.0)	29.0 (31.8)	75.7 (21.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	25.1 (19.6)	27.4 (19.1)	32.0 (16.5)	52.0 (25.0)	88.8 (12.6)	35.9 (11.0)	42.0 (20.5)	116.4 (15.5)	33.7 (6.4)	43.5 (2.5)	151.9 (8.2)	239.5 (9.1)
Serpentina	200.7 (72.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	11.9 (2.2)	72.7 (4.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	95.6 (18.2)	173.2 (10.1)	49.5 (2.7)	74.6 (2.8)
Plagioclasa	32.9 (11.9)	32.2 (35.4)	149.8 (43.1)	460.9 (86.6)	1191.4 (78.7)	6.7 (5.2)	3.7 (2.6)	14.7 (7.6)	2.1 (1.0)	296.7 (42.1)	55.4 (17.1)	0.0 (0.0)	265.4 (35.3)	126.0 (24.1)	659.9 (38.4)	377.6 (20.4)	314.9 (12.0)
Microclino	0.1 (0.0)	0.8 (0.9)	6.0 (1.7)	19.4 (3.6)	55.1 (3.6)	0.1 (0.1)	0.0 (0.0)	0.1 (0.0)	0.0 (0.0)	13.5 (1.9)	0.8 (0.3)	0.0 (0.0)	3.8 (0.5)	9.7 (1.9)	43.5 (2.5)	32.8 (1.8)	29.1 (1.1)
Pirita	7.0 (2.5)	1.5 (1.7)	4.8 (1.4)	21.6 (4.1)	87.7 (5.8)	3.3 (2.6)	0.5 (0.3)	6.3 (3.2)	3.0 (1.4)	58.2 (8.0)	23.1 (7.1)	14.0 (7.0)	36.5 (4.9)	56.9 (10.9)	379.8 (22.1)	505.3 (27.3)	836.2 (32.0)
H2S	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	21.6 (1.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	8.1 (1.2)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	10.0 (1.3)	26.1 (5.0)	169.6 (11.4)	18.1 (1.0)	17.3 (0.7)
Total	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)

5) M. Cajalbana 1; 1) M. Arroyo La Sed; 3) Sumidero Mamey; 53) Pozo P3 40 m; 54) M. Mil Cumbres Sulfuroso; 10) Cueva Lechuza; 14) M. Macagua; 20) Surgencia Ancón; 24) M. Lucas; 28) M. Cacarajicara sulfuroso; 30) M. Mil Cumbres; 30) M. Mil Cumbres; 41) R. Taco Taco; 43) M. La Pastora; 51) M. Soroa; 52) Pozo El Sitio; 59) M. El Templado; 60) M. La Gallina.

Tabla 4 - Fórmulas de las plagioclasas de la Formación San Cayetano.

Punto de muestreo	$R = \frac{Na}{Ca}$	x	y	X + y	$A = \frac{x}{x+y}$	$B = \frac{y}{x+y}$	$C = \frac{x+2y}{x+y}$	$D = \frac{3x+2y}{x+y}$	$Na_A Ca_B Al_C Si_D O_8$
P 3-40 m	20.1	3.21	0.16	3.37	0.95	0.05	1.05	2.95	Na <sub>0.95</sub> Ca <sub>0.05</sub> Al <sub>1.05</sub> Si <sub>2.95</sub> O <sub>8</sub>
P 4	13.5	9.31	0.69	10.00	0.93	0.07	1.07	2.93	Na <sub>0.93</sub> Ca <sub>0.07</sub> Al <sub>1.07</sub> Si <sub>2.93</sub> O <sub>8</sub>
Mil Cumbres Sulfuroso	8.3	9.15	1.10	10.25	0.89	0.11	1.11	2.89	Na <sub>0.89</sub> Ca <sub>0.11</sub> Al <sub>1.11</sub> Si <sub>2.89</sub> O <sub>8</sub>
Rancho Mar	7.3	14.61	1.99	16.60	0.88	0.12	1.12	2.88	Na <sub>0.88</sub> Ca <sub>0.12</sub> Al <sub>1.12</sub> Si <sub>2.88</sub> O <sub>8</sub>
El Sitio	10.9	4.44	0.41	4.85	0.92	0.08	1.08	2.92	Na <sub>0.92</sub> Ca <sub>0.08</sub> Al <sub>1.08</sub> Si <sub>2.92</sub> O <sub>8</sub>

Fórmula aproximada: Na<sub>0.9</sub>Ca<sub>0.1</sub>Al<sub>1.1</sub>Si<sub>2.9</sub>O<sub>8</sub>

Relación molar media (R = Na/Ca) de la Fm. San Cayetano = 12.3

Relación molar media (R = Ca/Mg) de la Fm. Artemisa = 8.1

## REFERENCIAS

1. ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA, 1988. Mapa geológico de Cuba. Escala 1: 250 000.
2. APHA-AWWA-WPCF, 1989, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17 ed APHA, AWWA, WPCF. Washington. Appelo C. A. J. and D. Postma, 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 p.
3. FAGUNDO, J. R., J. E. RODRÍGUEZ, J. M. PAJÓN, E. FRANCO, G. BENÍTEZ, A. C. RODRÍGUEZ, J. GÜERÓN e I. ABELLÓ. 1993. Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Guajaibón y otras áreas cársicas cercanas a la Sierra del Rosario. En: Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas (1992). Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 43-53.
4. FAGUNDO, J. R. 1998. Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. Ingeniería Hidráulica, 19 (2): 62-78, ISSN 0253-0678.
5. FAGUNDO, J. R., J. J. CARRILLO-RIVERA, I. ANTIGÜEDAD, P. GONZÁLEZ, R. PELÁEZ, M. SUÁREZ, CL. MELIÁN, R. HERNÁNDEZ, D. CÁCERES. 2004 a. Caracterización hidrogeoquímica del sistema de flujo local-regional de la Sierra del Rosario (Cuba). En: Proceeding del XXXIII Congress AIH "Groundwater Flow Uderestanding: From Local to Regional Scale, 4 pp, México. ISBN: 970-32-1749-
6. FAGUNDO, J. R., P. GONZÁLEZ, M. RODRÍGUEZ-PIÑA, M. SUÁREZ, C. MELIÁN. 2004 b. Aplicaciones de la cinética en la hidrogeología y el medio ambiente. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. 5, X Taller. ISCTN, 220 pp. ISBN 959-7136-20
7. FAGUNDO, J. R., P. GONZÁLEZ, J. CARRILLO, I. ANTIGÜEDAD, R. PELÁEZ, M. SUÁREZ, MELIÁN, R. HERNÁNDEZ, D. CÁCERES. 2005 a. Caracterización del sistema de flujo local-regional de la Sierra del Rosario (Cuba) mediante modelos hidrogeoquímicos. Memorias Convención Ciencias de la Tierra, GEOMIN 2005, 28 pp. ISBN 959-7117-03-7.
8. FAGUNDO J. R., P. GONZÁLEZ, M. SUÁREZ MUÑOZ, J. FAGUNDO-SIERRA, C. MELIÁN, E. ALVAREZ. 2005 b. HIDROGEOQUIM. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. Vol 6. ISBN 959-7136-24-4.
9. FAGUNDO-SIERRA, J., J. R. FAGUNDO, P. GONZÁLEZ, M. SUÁREZ. 2001. Modelación de las aguas naturales. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. VII. ISCTN, La Habana 2001. ISBN 959-7136-13-9.
10. FAGUNDO-SIERRA, J., J. R. FAGUNDO, P. GONZÁLEZ, M. SUÁREZ, C. MELIÁN. 2002. Sistema de base de datos de aguas minerales y mineromedicinales (TERMADAT). Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. VIII. ISBN 959-7136-13-9.
11. FRANCO, E., J. R. FAGUNDO, J. M. PAJÓN. 1987. Resultados de los estudios hidroquímicos realizados en el Pan de Guajaibón en el período enero 28 a febrero 17 de 1986. Revista Ciencias de la Tierra, 11, 17 pp.
12. GONZÁLEZ, P., M. SUÁREZ, G. BENÍTEZ, J. RAMÍREZ y J. R. FAGUNDO. 2000. Caracterización de aguas minerales de algunos yacimientos del país. Le Monde du Thermalisme. Ed. L' Organisation Mondiale du Thermalisme (O.M.Th). París (Francia), 14-15.
13. KRAWCZYK, W. 1992. Methods of field analytic of karst water. In: Hydrochemical methods in dynamic geomorphology. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice, (1254), 65-83.
14. PELÁEZ, R, M. OLIVARES, M. DEL C. NÚÑEZ y M. VALDIVIA. 1990. Informe sobre la búsqueda detallada y exploración orientativa de las aguas minero-medicinales San Diego Bermejales. Ministerio de la Industria Básica, Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, Cuba. 159 pp.

15. PSZCZOLKOWSKI, A. 1978. Geosynclinal Sequences of the Cordillera de Guaniguanico in Western Cuba, their Lithostratigraphy, Facies Development and Paleogeography. *Acta Geológica Polónica*, 28 (1) 1-96.
16. PULINA, M., FAGUNDO, J. R. 1984. The Dynamics of Contemporary Karst Processes in the Tropical Area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the Expedition GUAJAIBON'84 in the winter season 1984. Ed. Univ. Slaski. Sosnowice, 42 pp.
17. RODRÍGUEZ-PIÑA, M. 2005. Aplicaciones de la Química Física en la caracterización del sistema de flujos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río. Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Centro de Estudios de Medio Ambiente, (UH).
18. RODRÍGUEZ-PIÑA, M., J. R. FAGUNDO, P. GONZÁLEZ, J. R. HERNÁNDEZ-SANTANA, J. CARRILLO-RIVERA, ANTIGÜEDAD, A. ABRAHAM, M. SUÁREZ, C. 2005. Patrones y procesos hidrogeoquímicos de la Sierra del Rosario y su relación con el medio ambiente geológico. *Contribución a la Educación y Protección Ambiental*. Vol 6. ISBN 959-7136-24-4.



# PROCESOS GEOQUÍMICOS Y CALIDAD DE LAS AGUAS EN ACUÍFEROS CÁRSICOS COSTEROS CONTIGUOS A UN HUMEDAL

## GEOCHEMICAL PROCESSES AND WATER QUALITY IN CARSIIC COASTAL AQUIFERS ADYACENT TO A WETLAND

P. GONZÁLEZ, J. R. FAGUNDO, M. SUÁREZ, C. MELIÁN  
Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (Cuba)

### RESUMEN

*En estudios realizados, mediante un sistemático programa de muestreo y análisis químico de campo y de laboratorio, se identificaron los principales procesos geoquímicos que controlan la composición química de las aguas en las diferentes zonas hidrogeológicas del acuífero kárstico costero Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana. Entre estos procesos se destacan: oxidación de sulfuros, fundamentalmente en la zona no saturada del acuífero; reducción anaeróbica de sulfatos y oxidación de la materia orgánica, especialmente en las zonas de interfaz y profunda de los pozos cercanos a la zona cenagosa; disolución y precipitación de calcita y dolomita en la zona de mezcla; intercambio iónico, tanto de carácter directo como inverso, así como otros procesos inherentes a la mezcla.*

*Para evaluar la influencia del humedal en la hidrogeoquímica del sistema se estudia el pozo Alvaro Barba, ubicado dentro del mismo, a la profundidad de 23 m, representativa de la zona de dispersión de mezcla agua dulce-agua de mar.*

*Los resultados obtenidos muestran la intensidad de los procesos hidrogeoquímicos que se ponen de manifiesto en este pozo, dado por la magnitud de los deltas iónicos (meqv/L) obtenidos, para los iones mayoritarios, los porcentajes de agua de mar en la mezcla y las cantidades de  $\text{Ca}^{2+}$  precipitados (meqv/L), en forma de carbonatos (calcita, dolomita, y Mg-calcita).*

**Palabras Clave:** hidrogeoquímica, carbonatos, reducción de sulfatos

### INTRODUCCIÓN

Los procesos geoquímicos que tienen lugar en las zonas costeras kársticas son muy complejos, debido a que se producen mezclas entre el agua dulce procedente del acuífero y el agua de mar, cuyas propiedades químicas y físicas son muy diferentes y van acompañadas de procesos modificadores de la composición química que debía esperarse por la simple mezcla entre agua dulce y agua de mar (Wigley y Plummer, 1976; Hanshaw y Back, 1980; Back *et al.*, 1986; Giménez, 1994; Fagundo *et al.*, 1996; Morell *et al.*, 1997; Ferrera *et al.*, 1995). En general, mediante mezcla de aguas de diferente naturaleza hidrogeológica, se producen reacciones químicas que pueden dar lugar a la disolución o precipitación de minerales. En terrenos kársticos contiguos a un humedal, el suministro de materia orgánica produce procesos de tipo biogeoquímicos de reducción de sulfato acompañados de producción de dióxido de carbono lo cual intensifica aún más la disolución de las calizas (Fagundo y González, 1999). En este trabajo se muestran los resultados de un estudio detallado de carácter geoquímico llevado a cabo entre 1997 y 1998 en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana (Figura 1), especialmente en el Pozo Alvaro Barba, el cual se encuentra ubicado en una región constituida por un humedal.

El objetivo del trabajo es estudiar el efecto que ejerce el humedal sobre los procesos geoquímicos que se producen en los acuíferos kársticos costeros que originan la calidad del agua.

## MARCO GEOGRÁFICO, HIDROGEOLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO

El pozo Álvaro Barba se encuentra ubicado en la zona de humedal del sector hidrogeológico Güira-Quivián de la Cuenca Sur de La Habana. Esta región está constituida por rocas carbonatadas muy karstificadas de edad Neógeno, pertenecientes a las formaciones Jaruco, Husillo, Cojimar y Güines. Estas rocas son muy acuíferas, su trasmisividad varía entre 5000 y 50000 m<sup>2</sup>/d, mientras el coeficiente de almacenamiento alcanza valores desde 0.15 en condiciones de acuífero libre, hasta 0.005 en condiciones de semiconfinamiento (González, 1997). Por otra parte la zona del humedal, proporciona un exceso de materia orgánica así como de ácidos orgánicos que influirán en los procesos geoquímicos de disolución de los carbonatos. También se pueden esperar procesos de intercambio iónico entre el calcio disuelto contenido en las aguas subterráneas y la materia orgánica (intercambio iónico directo) o entre la materia orgánica saturada en calcio y el sodio procedente del agua de mar (intercambio iónico inverso). Estos procesos pueden originar una modificación de la composición química del agua subterránea que se dirige al mar, lo cual daría lugar a aguas de tipo mixtas tanto en sus aniones como cationes, similares a los procesos de interacción agua-roca en condiciones de intercambio iónico.



Figura 1 - Área de Estudio

## MATERIALES Y MÉTODOS

El pozo Alvaro Barba, como parte de una red de observaciones sistemáticas, que se estableció en el área de estudio (Figura 1), fue muestreado mensualmente a partir del mes de enero de 1997 hasta junio de 1998, en tres niveles de profundidad, representativos de las zonas de agua dulce, de mezcla y de contacto entre el agua dulce y el agua de mar. Para el presente estudio se selecciona la data para la profundidad de 23 metros, representativa de la zona de mezcla agua dulce-agua de mar.

Las mediciones de los parámetros físico - químicos se realizaron "in situ" mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424 marca HANNA y oxímetro HANNA modelo HI 914. Los contenidos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, así como la alcalinidad total (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) fueron también determinados en el campo, mientras que los restantes macroconstituyentes (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>

y  $Mg^{2+}$ ) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomada la muestra. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1989). Los iones  $Na^+$  y  $K^+$  fueron determinados por fotometría de llamas (fotómetro marca SOLAR 919 de la UNCAM. La calidad de los datos fue validada mediante el balance iónico y el cálculo de las conductividades eléctricas teóricas basado en el modelo de Miller *et al.* (1986), implementado en el sistema informático HIDROGEOWIN (Alvarez *et al.*, 1998), con el cual se calcularon además los índices de saturación y otros indicadores geoquímico.

Los procesos geoquímicos fueron determinados mediante el cálculo de los deltas iónicos, haciendo uso de un software basado en un modelo de balance de masas y mezcla de aguas MODELAGUA (Fagundo-Sierra *et al.*, 2001). El resto del procesamiento se efectuó mediante EXCEL.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que, en esta zona las aguas son del tipo Clorurada Sódica Cálcica, reflejando la intensidad de los procesos hidrogeoquímicos que se ponen de manifiesto en este pozo, dado por la magnitud de los deltas iónicos (meqv/L) obtenidos, para los iones mayoritarios, los porcentajes de agua de mar en la mezcla y las cantidades de  $Ca^{2+}$  precipitados (meqv/L), en forma de carbonatos (calcita, dolomita, y Mg-calcita) (Tabla 1).

Partiendo de la hipótesis de que las variaciones de cada una de estas magnitudes estarán asociadas a los procesos modificadores de la composición química de las aguas naturales y diagenéticos, que acompañan a la intrusión marina, se tendrá que las variaciones en el  $\Delta SO_4^{2-}$  vendrán dadas por el fenómeno de reducción bacteriana de sulfatos, que depende del porcentaje de agua de mar en la mezcla, pues es del agua de mar que provienen los iones sulfatos, y porque a una cierta salinidad de las aguas de mezcla se inhibe la actividad microbiológica de las bacterias sulfato reductoras y de la cantidad de materia orgánica que se oxida. Las variaciones en el  $\Delta Na^+$  y  $\Delta K^+$ , vienen dados por el fenómeno de intercambio iónico y también están relacionadas con el porcentaje de agua de mar en la mezcla (el sodio y el potasio son aportados por el agua de mar) y con la cantidad de materia orgánica presente, que actúa como material intercambiador. Las variaciones en los  $\Delta Ca^{2+}$ ,  $\Delta Mg^{2+}$  y  $\Delta HCO_3^-$ , están determinadas por los procesos de intercambio iónico, que pueden involucrar a los primeros iones, la disolución-precipitación de carbonatos (calcita, dolomita y Mg-calcita) y la reducción de sulfatos que actúa sobre el equilibrio de los carbonatos.

Para poder dilucidar cómo se relacionan entre sí todos estos procesos, se hace una matriz de correlación entre todas estas variables (% de mezcla,  $\Delta SO_4^{2-}$ ,  $\Delta Na^+$  y  $\Delta K^+$ ,  $\Delta Ca^{2+}$  y  $\Delta Mg^{2+}$ ) y se añade además  $mCa^{2+}$ , que representa los miliequivalentes de  $Ca^{2+}$  precipitados (signo negativo) o disueltos (signo positivo) (Tabla 2).

Estos resultados muestran cómo correlacionan entre sí, de manera significativa y altamente significativa, el % de mezcla,  $\Delta SO_4^{2-}$ ,  $\Delta HCO_3^-$ ,  $\Delta Ca^{2+}$ ,  $\Delta Na^+$ ,  $\Delta K^+$  y  $mCa^{2+}$ , poniendo al relieve la influencia del humedal, con su aporte de materia orgánica, en la hidrogeoquímica del sistema, y cómo dependen del porcentaje de agua de mar en la mezcla los procesos de reducción de sulfato, intercambio iónico y precipitación de carbonatos.

Tabla 1 - Resultados obtenidos para el pozo Alvaro Barba a 23 m de profundidad durante el período comprendido entre 01/31/97 y 10/06/98 (Las fechas están representadas como en el sistema inglés: mes, día y año)

Pozo	Fecha	$\Delta\text{SO}_4^{2-}$	$\Delta\text{HCO}_3^-$	$\Delta\text{Ca}^{2+}$	$\Delta\text{Mg}^{2+}$	$\Delta\text{Na}^+$	$\Delta\text{K}^+$	mCa <sup>2+</sup>	% Mezcla	Tipo de Agua
Alvaro Barba	01/31/97	-17.52	-3.85	57.78	-10.24	-69.30	-1.61	-23.37	37.75	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	02/27/97	-12.95	-3.85	44.08	-6.74	-55.31	-1.28	-19.24	29.71	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	03/28/97	-21.91	-3.28	60.89	-12.52	-75.31	-1.84	-28.78	49.36	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	04/25/97	-27.61	-2.69	55.12	-13.24	-73.66	-1.93	-33.72	61.86	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	05/29/97	-23.74	-3.26	57.74	-11.77	-74.93	-1.86	-30.82	53.38	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	06/27/97	-20.89	-3.15	56.26	-12.66	-68.51	-1.69	-26.60	47.13	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	07/14/97	-16.41	-3.61	52.85	-12.27	-61.13	-1.46	-22.01	37.30	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	09/02/97	-25.98	-3.20	51.95	-11.76	-70.53	-1.84	-32.19	58.29	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	09/29/97	-24.26	-3.28	47.34	-7.87	-68.31	-1.77	-30.60	55.83	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	10/30/97	-15.09	-4.20	43.28	-6.93	-55.82	-1.11	-20.57	34.63	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	12/22/97	-14.27	-4.03	41.22	-9.10	-50.87	-1.22	-19.97	31.95	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	01/30/98	-11.20	-4.23	27.20	-5.17	-43.68	-1.20	-22.85	25.88	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	02/27/98	-12.23	-4.20	27.09	-8.43	-35.54	-0.34	-17.22	26.59	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	03/28/98	-8.92	-4.10	5.20	-13.62	-5.95	0.27	-14.11	20.34	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	05/06/98	-22.01	-3.47	37.82	-12.99	-69.90	-1.73	-46.80	49.80	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	07/15/98	-16.50	-4.02	31.14	-8.88	-43.53	-1.12	-22.39	35.52	Cl: Na >Ca
Alvaro Barba	10/09/98	-15.98	-3.76	36.55	-10.77	-46.69	-1.28	-22.20	35.50	Cl: Na >Ca

$$m\text{Ca}^{2+} = |\Delta\text{Ca}^{2+} - (\Delta\text{Mg}^{2+} + \Delta\text{Na}^+ + \Delta\text{K}^+)|$$

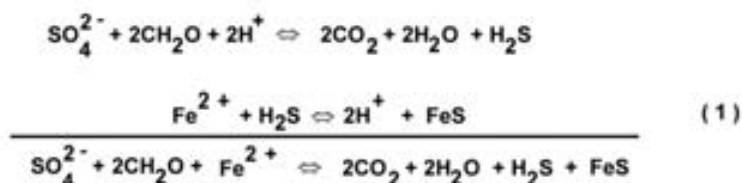
Tabla 2 - Matriz de correlación

	$\Delta\text{SO}_4^{2-}$	$\Delta\text{HCO}_3^-$	$\Delta\text{Ca}^{2+}$	$\Delta\text{Na}^+$	$\Delta\text{K}^+$	$\Delta\text{Mg}^{2+}$	mCa <sup>2+</sup>	%MEZCLA
$\Delta\text{SO}_4^{2-}$	1	-0.92	-0.73	0.84	0.83	0.46	0.80	-0.99
$\Delta\text{HCO}_3^-$		1	0.68	-0.73	-0.75	-0.61	-0.70*	0.92
$\Delta\text{Ca}^{2+}$			1	-0.94	-0.88	-0.22	-0.45	0.72
$\Delta\text{Na}^+$				1	0.96	0.20	0.71	-0.84
$\Delta\text{K}^+$					1	0.17	0.73	-0.84
$\Delta\text{Mg}^{2+}$						1	0.40	-0.45
mCaCO <sub>3</sub>							1	-0.81
%MEZCLA								1

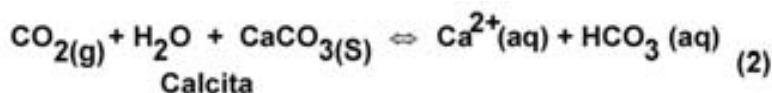
A continuación se presenta una secuencia de procesos y reacciones químicas que pueden explicar la geoquímica de este sistema tan heterogéneo.

1. La presencia del ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , proveniente del agua de mar, en la mezcla, junto a la materia orgánica proporcionada por el humedal, propician la reducción anaeróbica del sulfato, a través de bacterias sulfatoreductoras. Los iones sulfatos se reducen a iones sulfuros, y estos se combinan con el hierro ferroso precipitando en forma de sulfuros (pirita). Este proceso se hace más intenso a medida que aumenta el porcentaje de agua de mar en la mezcla hasta cierto límite, pues la actividad de las bacterias se inhibe en ambiente muy salino.

El proceso total se puede representar de la siguiente forma:



2. El  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$  generado en la reacción anterior actúa sobre el carbonato de calcio del material acuífero, disolviendo cierta porción del mismo y aportando a la solución iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$



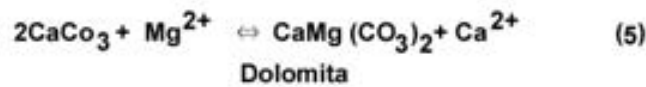
La materia orgánica, constituida, entre otros componentes, por ácidos húmicos y fúlvicos reaccionan con el  $\text{Ca}^{2+}$  para formar iones complejos de tipo quelatos.



3. Los quelatos de calcio, así formados, intercambian con el sodio marino que invade el acuífero produciéndose un intercambio iónico inverso. En otras palabras, el  $\text{Ca}^{2+}$ , retenido en la materia orgánica procedente del humedal se intercambia por el Na disminuyendo así el contenido de  $\text{Na}^+$  en el agua de mezcla e incrementándose el  $\text{Ca}^{2+}$ .



4. El exceso de  $\text{Ca}^{2+}$ , junto a la presencia de  $\text{Mg}^{2+}$  proveniente del agua de mar, trae consigo la precipitación de carbonatos, ya sea calcita, aragonita, dolomita o la recristalización de Mgcalcita altas a Mg-calcita bajas, según lo favorezcan las condiciones termodinámicas del sistema.



Estos procesos pueden generar  $\text{CO}_2$  capaz de disolver nuevamente roca carbonatada e inducir un nuevo intercambio iónico creando así un tipo de reacción en cadena.

Los resultados obtenidos en este apartado muestran la complejidad de la hidrogeoquímica de aquellos acuíferos cársicos afectados por la *intrusión marina*, donde las condiciones naturales favorecen, la ocurrencia de todos los procesos modificadores y diagenéticos que acompañan a la misma, además de plantear, de una manera simplificada, la secuencia de los procesos y reacciones químicas que explican la geoquímica de este sistema tan heterogéneo.

## CONCLUSIONES

El presente estudio muestra que los parámetros % de mezcla,  $\Delta\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\Delta\text{HCO}_3^-$ ,  $\Delta\text{Ca}^{2+}$ ,  $\Delta\text{Na}^+$ ,  $\Delta\text{K}^+$  y  $\text{mCa}^{2+}$  correlacionan entre sí, de manera significativa y altamente significativa. Esto evidencia la influencia del humedal en los procesos modificadores que acompañan a la *intrusión marina*, la relación entre los mismos, y permite establecer una secuencia de procesos y reacciones químicas que explican la geoquímica del sistema, los cuales conforman un ciclo iniciado por la reducción de sulfatos, seguida por la disolución de carbonatos, el intercambio iónico y la precipitación de carbonatos, produciendo de esta forma aguas del tipo clorurdas sódicas cálcicas.

## REFERENCIAS

1. ALVAREZ, E, J. R. FAGUNDO e I. VINARDELL. 1998. Automatización del control de los parámetros químico físicos y la calidad de las aguas. En: Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Hombre y Medio Ambiente. Editorial Academia, La Habana, 164-167.
2. APHA-AWWA-WPCF. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17 ed. APHA, AWWA, WPCF. Washington. Appelo C. A. J. and D. Postma, 1993. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Ed. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 536 p.
3. BACK, W., B. B. HANSHAW, J. S. HERMAN y J. N. VAN DRIEL. 1986. Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico. *Geology*, 14 (2), 137-140.

4. FAGUNDO J. R, P. GONZÁLEZ, V. FERRERA, G. BENÍTEZ y R. FURET. 1996. Intensificación de la corrosión química por la actividad humana en los acuíferos kársticos del occidente de Cuba. En: "Contribuciones a la hidrogeología y medio ambiente en Cuba". Eds.: J.R. Fagundo Castillo, D. Pérez Franco, A. Alvarez Nodarse, J. M. García e I. Morell. Universidad de Castellón (España), 51-67.
5. FAGUNDO, J. R. y P. GÓNZALEZ (1999). Agricultural use and water quality at karstic west Cuban Southern plain. In: Karst and Agriculture in the World. International Journal of Speleology, (Italia)., 28 B (1/4): 175-185.
6. FAGUNDO-SIERRA J., J. R. FAGUNDO, P. GONZÁLEZ, M. SUÁREZ, C. MELIÁN. 2001. MODELAGUA, software para la determinación del origen de la composición química de las aguas minerales. Registro 08280-08280 (CENDA).
7. FERRERA V., J. R. FAGUNDO y G. B. BENÍTEZ. 1995. Caracterización hidrogeoquímica de las aguas de la cuenca cársica Costera Sur, tramo Güira-Quivicán, (Provincia Habana). En el Karst y los Acuíferos Karsticos. A. Pulido-Bosch, J.R. Fagundo, J.E. Rodríguez. 227-238.
8. GIMÉNEZ, E. 1994. Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón (España).
9. GONZÁLEZ, A. 1997. La recarga artificial contra la intrusión salina. ¿Hasta dónde resulta eficaz en las formaciones cársicas? En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguiedad, Bilbao, 89-103.
10. HANSHAW, B. B. y W. BACK. 1980. Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution. Geology, 8: 222-224.
11. MILLER, R. L., W. L. BRAFORD and N.E. PETERS. 1986. Specific conductance: theoretical considerations and application to analytical quality control. Ú.. Geological Survey Water-Supply. Paper 2311, 27 pp.
12. MORELL I., A. PULIDO-BOSCH, J. R. FAGUNDO, F. LÓPEZ-VERA, M. LÓPEZ-CHICANO y P. GONZÁLEZ. 1997. Caracterización de los acuíferos kársticos de la cuenca Zapata, Matanzas, Cuba. En: I Congreso Ibérico de Geoquímica. VII Congreso de Geoquímica de España. Editor: CEDEX, Soria (España): 367-374.
13. WIGLEY, T. M. L. y L. N. PLUMMER. 1976. Mixing of carbonate waters. Geochim. Cosmochim. Acta. 40: 489-995.

V Conferencia Mundial FRIEND, La Habana, Cuba, 2006  
V FRIEND World Conference, Havana, Cuba, 2006

Impactos Hidrológicos de la Variabilidad y el Cambio Climático  
Hydrological Impacts of Climate Variability and Change

Selección de trabajos de América Latina y el Caribe  
Selected presentations on Latin America and the Caribbean



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



Programa Hidrológico Internacional

---

UNESCO  
Programa Hidrológico Internacional  
Oficina Regional de Ciencia  
para América Latina y el Caribe  
Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso  
Casilla de Correo 859  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: (598-2) 413 20 75, Fax: (598-2) 413 20 94  
phi@unesco.org.uy  
<http://www.unesco.org.uy/phi>

---

