

MODELADO HIDROLÓGICO DE GRANDES CUENCAS: CASO DE ESTUDIO DEL RÍO SENEGAL, ÁFRICA OCCIDENTAL

• Khalidou M. Bâ • Carlos Díaz-Delgado* •
Universidad Autónoma del Estado de México

*Autor de correspondencia

• Emmanuelle Quentin •
Universidad Nacional de Loja, Ecuador

• Víctor Hugo Guerra-Cobián •
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

• Jaime Israel Ojeda-Chihuahua •
Universidad Autónoma del Estado de México

• Alin Andrei Cârsteanu •
Instituto Politécnico Nacional, México

• Roberto Franco-Plata •
Universidad Autónoma del Estado de México

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la modelación de los escurrimientos diarios de grandes cuencas bajo el empleo del modelo de parámetros distribuidos *CEQUEAU* y del *software* de sistemas de información geográfica *IDRISI*. Se implementó un módulo hidrogeomático que proporciona, bajo un proceso supervisado, la información de entrada requerida por el modelo hidrológico. Se han utilizado imágenes de radar *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission-USGS*), con resolución espacial de 30'' (≈ 1 km) para la delimitación del parteaguas de la cuenca, con lo cual se eliminan fuentes de incertidumbre significativas, reduciendo tiempos de procesamiento. El caudal del río Senegal ha sido aforado en la estación hidrométrica Bakel desde inicios del siglo XX y se cuenta con una serie de datos relativamente abundante. Se han llevado a cabo diversos estudios hidrológicos sobre la cuenca, donde se reporta un área de captación cercana a 289×10^3 km², pero altamente subestimada, según revela este estudio. La cuenca presenta condiciones climáticas muy diversas, con alta variabilidad en la precipitación total anual, desde 2 000 mm en el sur hasta 50 mm en el norte. Los parámetros fisiográficos han sido calculados considerando la extensa superficie de la cuenca localizada en Mauritania, despreciada en estudios previos como parte de ésta. Las simulaciones de caudales para el periodo 1970-2000 generan buenos resultados (coeficiente de Nash, por lo general superiores a 0.80), por ello se concluye que utilizando el nuevo módulo hidrogeomático y el modelo *CEQUEAU*, las simulaciones son más adecuadas y representan una base sólida para la gestión de recursos hídricos de la zona.

Palabras clave: módulo hidrogeomático, grandes cuencas, río Senegal, modelo distribuido, *SIG-IDRISI*, *CEQUEAU*.

Introducción

El modelado hidrológico de cuencas es una herramienta de gran utilidad para explicar los

problemas relacionados con los recursos hídricos, tales como el análisis de cantidad y calidad de agua escurrida en una cuenca, el pronóstico hidrológico, etcétera. Por otro lado,

los modelos hidrológicos distribuidos son una herramienta eficaz en los procesos de planeación y gestión de recursos hídricos. En efecto, estas herramientas no sólo son útiles en la predicción de condiciones futuras de flujo, sino también en la evaluación de impactos ante cambios de uso de suelo, variabilidad climática y modificaciones antropogénicas en la cuenca, a través de la simulación de escenarios. Además, el desarrollo y empleo de módulos hidrogeomáticos incorporados en un sistema de información geográfica (SIG) facilita la determinación de información espacial y temporal de una cuenca, tales como uso de suelo, características fisiográficas y distribución espacial de variables climatológicas. Es importante subrayar que cuando los modelos son alimentados con información inadecuada, los resultados obtenidos no pueden ser acertados. Prueba de ello son las estimaciones insatisfactorias obtenidas en diversos estudios sobre la simulación diaria de caudales del río Senegal (Andersen *et al.*, 2001; Coly *et al.*, 2008). Así, en el presente estudio, se hace énfasis en el empleo de un módulo hidrogeomático, desarrollado en el *SIG-IDRISI*, que facilitó la determinación de las características fisiográficas del río Senegal y la transferencia de información al modelo *CEQUEAU* para la simulación de caudales diarios.

Materiales y métodos

Modelo hidrológico *CEQUEAU*

El modelo hidrológico utilizado es el de parámetros distribuidos *CEQUEAU* (Morin y Paquet, 2007). Este modelo es de tipo determinístico y de simulación continua, que discretiza la cuenca en una malla de celdas, considerando las variaciones espaciotemporales tanto de las características físicas como de los datos meteorológicos. *CEQUEAU* ha sido implementado con éxito en diversas cuencas de varios países (OMM, 1992; Bà *et al.*, 2001; Shing y Frevert, 2002; Morin y Paquet, 2007).

La información fisiográfica requerida por el modelo tradicionalmente se obtiene en forma manual a partir de cartas topográficas de la zona en estudio, y su preparación requiere de una gran inversión de tiempo y esfuerzo. Este proceso presenta un gran riesgo de acumulación de errores humanos en la extracción de datos, por lo que es necesario un proceso exhaustivo de verificación y control de calidad.

En el presente estudio se han utilizado imágenes raster STRM (Shuttle Radar Topography Mission, USGS) con resolución horizontal de 30" (≈ 1 km) para la delimitación de los parteaguas de las cuencas. Originalmente, SRTM capturó los datos con una resolución de 1", pero por la extensión de la zona de estudio, fue necesario trabajar con la imagen SRTM disponible a 30".

La implementación del modelo hidrológico requirió de tres archivos: de datos fisiográficos de la cuenca, de datos hidrometeorológicos de las estaciones disponibles y de los parámetros de ajuste del modelo. Para crear el archivo de datos fisiográfico se utilizó un modelo numérico de altitud (MNA), así como un nuevo módulo hidrogeomático que trabaja en el *SIG-IDRISI* (Guerra-Cobián, 2007), y desarrollado para automatizar el proceso de extracción de los sentidos del flujo y la ocupación del suelo de cada celda de la malla en que se discretiza la cuenca, en formato *CEQUEAU*. Se construyeron los archivos de datos hidrometeorológicos con los datos de las estaciones climatológicas localizadas en la zona de estudio. Por último, se efectuó la calibración y validación con base en el ajuste de los parámetros del modelo hidrológico, utilizando el criterio numérico propuesto por Nash y Sutcliffe (1970). El procedimiento de calibración se realizó, primero, usando la técnica de prueba y error, y luego el algoritmo de optimización incluido en el modelo. Se calibraron los parámetros del modelo que controlan el flujo vertical del agua (alturas de vaciado, umbrales de agua en los recipientes, etcétera), así como los coeficientes del flujo de los recipientes.

Módulo hidrogeomático

La generación de los archivos requeridos en la modelación hidrológica se efectúa de forma automatizada. Para ello, se implementó un módulo hidrogeomático que trabaja en el SIG-*IDRISI* (Eastman, 2009). En la implementación del módulo se decidió considerar sólo el flujo del agua en celdas enteras, dado que la automatización del proceso en SIG permite tener celdas tan pequeñas o finas como la resolución del MNA lo permite. El archivo principal que este módulo genera es el de los datos fisiográficos (*.PHY), el cual proporciona para cada celda su celda receptora (en función del sentido de flujo), su porcentaje de cobertura de suelo (bosques, lagos y ciénagas) y la altitud media. Para las celdas del límite de cuenca (parteaguas) se utilizan dos celdas parciales, a fin de permitir una mejor precisión en el cálculo de superficies; una fluye en una celda dentro de la cuenca y la otra fluye fuera de la cuenca, excepto para la celda donde se ubica la estación hidrométrica, para la cual, las dos celdas parciales tienen que fluir hacia afuera. El criterio utilizado para determinar los sentidos del flujo en cada celda es concurrente con el píxel de menor altitud dentro de las ocho celdas vecinas a la celda considerada. El archivo con extensión *.BV (cuenca vertiente) contiene los parámetros de la estación hidrométrica, como son: el nombre o código, la ubicación de la celda en coordenadas *CEQUEAU*, el área de cuenca y el número de estaciones hidrométricas adicionales.

Cuenca del río Senegal

La cuenca del río Senegal está ubicada al occidente del continente africano y el río que la drena es el segundo más grande de la región (figura 1). Dicha cuenca es compartida por cuatro países: Guinea, Mali, Mauritania y Senegal, y presenta una gran variación espacial del régimen de precipitación, que va desde los 2 000 mm/año en el sur hasta 50 mm/año en el norte. El río Senegal es uno de los más

estudiados de África y cuenta con registros hidrométricos desde 1903 en la estación Bakel. El régimen de flujo del río Senegal corresponde al régimen pluviométrico de la cuenca, con una temporada de lluvia que por lo general inicia en junio y termina en octubre, alcanzando los máximos valores de flujo entre agosto y septiembre, para posteriormente reducirse de manera significativa entre los meses de marzo y abril. Esta cuenca es administrada por la Organización de Desarrollo del Río Senegal (OMVS). Tal organización ha implementado dos proyectos de gran envergadura: la construcción de las presas Diama y Manantali. La presa Diama tiene la finalidad, principalmente, de bloquear el flujo de agua salada que transitaba desde el océano Atlántico hasta tierras lejanas continentales; esta obra favoreció la recuperación de grandes zonas que se han incorporado a la explotación agrícola. La presa Manantali ha sido concebida como una central hidroeléctrica para la generación de energía y también como embalse regulador de caudales, con objeto de permitir la navegación y el riego de miles de hectáreas aguas abajo.

La información cartográfica disponible corresponde a cartas topográficas que cubren la totalidad de la cuenca, está disponible sólo para una escala de 1:200 000 y data de 1950, con actualizaciones parciales de mayor detalle entre los años 1970 y 1980, y más recientes. Además, es importante subrayar que los estudios y proyectos realizados hasta la fecha sobre esta zona tienen como base la información contenida en dicha cartografía.

Resultados

En este estudio se utilizaron tres estaciones hidrométricas. En dos (Bakel y Kayes) se simularon los caudales diarios y en la tercera (embalse de Manantali) se simularon los niveles de agua diarios. Con respecto a la nueva delimitación del parteaguas de la cuenca del río Senegal, las características principales de la misma fueron reestimadas y se presentan en el cuadro 1. Es importante

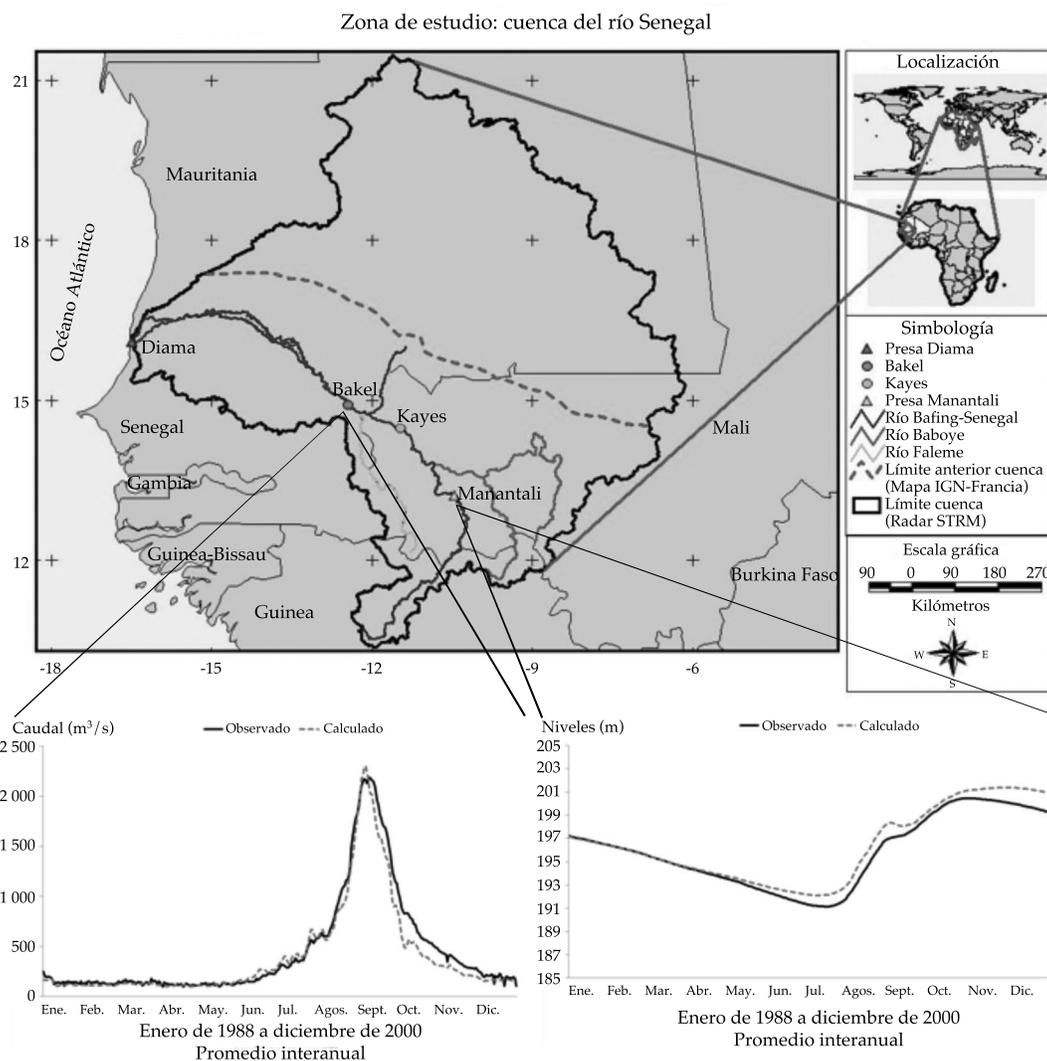


Figura 1. Resultados de la modelación hidrológica en la cuenca del río Senegal.

señalar que el área de captación en el norte de la cuenca del río Senegal es muy diferente a lo reportado y que prácticamente siempre ha sido subestimada. En realidad, el área drenada de las cuencas hasta las estaciones hidrométricas de Bakel y Kayes resultan ser mayores al doble de las superficies reportadas en estudios previos.

La figura 1 muestra el límite real del parteaguas de la cuenca en estudio en línea continua, y la línea punteada representa la definición del perímetro según estudios

anteriores. En consecuencia, el área de drenaje real total del río Senegal es de 649 000 km², con una longitud del río de 1 637 km y una superficie de 418 600 km², con un trayecto de río de 915 km hasta la estación hidrométrica Bakel. El porcentaje de área de la cuenca en los cuatro países es de 5 en Guinea, 27 en Mali, 56 en Mauritania y 12 en Senegal.

La cuenca fue discretizada en celdas de 25 km por lado, y el módulo hidrogeomático desarrollado permitió la definición de las direcciones de flujos. La función de produc-

Cuadro 1. Características de la cuenca del río Senegal y de sus principales subcuencas.

	Parámetros	Unidades	Cuenca			
			Senegal	Bakel	Kayes	Manantali
Parámetros de la cuenca	Área (OMVS)	km ²	289 000	218 000	157 400	27 800
	Área (SIG)	km ²	649 000	418 600	332 600	27 900
	Perímetro	km	7 356	5 684	5 738	1 724
	Elevación media	m	240	280	301	558
	Pendiente media	%	0.89	1.09	1.01	3.21
	Coefficiente de compacidad	-	2.6	2.5	2.8	2.9
	Relación de circularidad	-	0.15	0.16	0.13	0.12
	Relación hipsométrica	-	1.55	1.32	1.15	0.98
	Tiempo de concentración	(Kirpich) días	17.0	8.7	7.4	4.5
Parámetros del río	Longitud río principal	km	1 637.3	915.4	795.5	550.5
	Coefficiente de sinuosidad	-	0.97	1.06	1.10	1.16
	Cota máxima msnm	m	1 189	1 189	1 189	1 189
	Cota mínima msnm	m	0	13	25	168
	Pendiente media del río	-	0.0007	0.0013	0.0014	0.0018

ción (Morin y Paquet, 2007), que es evaluada para cada una de las celdas enteras, requiere de información meteorológica diaria (precipitación y temperatura), así como de la información fisiográfica. En este trabajo se utilizó la información del periodo de registros de 1970 a 2000 de 87 estaciones climatológicas. El modelado hidrológico fue realizado en dos fases: la primera corresponde al periodo de 1970 a 1984, previo a la construcción del embalse Manantali, y la segunda, al periodo de 1988 a 2000. Se consideraron criterios gráficos y numéricos para la comparación de los caudales, y niveles observados y simulados. Se optó por mostrar la comparación de los hidrogramas interanuales observado y simulado (figura 1). Los parámetros óptimos conseguidos para el primer periodo han sido utilizados para el lapso de 1988 a 2000. Los resultados de criterio de Nash (cuadro 2) indican que las simulaciones son excelentes para el periodo anterior a la construcción del embalse, dado que todos son superiores a 0.752. Para el periodo posterior a

la construcción del embalse, las simulaciones también son excelentes para las dos estaciones hidrométricas, sin embargo, los niveles de agua no fueron simulados de manera satisfactoria para cuatro de los trece años considerados. En términos de coeficiente de Nash en un nivel interanual (ecuación (2)), los resultados también son ampliamente satisfactorios:

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Ci} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \bar{Q}_O)^2} \quad -\infty < NTD \leq 1 \quad (1)$$

$$NTD^* = 1 - \frac{\sum_{1}^{NY} \sum_{1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{1}^{NY} \sum_{1}^n (Q_{oi} - \bar{Q})^2} \quad -\infty < NTD^* \leq 1(2)$$

NTD: criterio de Nash-Sutcliffe anual.

NTD*: criterio de Nash-Sutcliffe interanual.

En donde Q_{oi} es el caudal diario observado; \bar{Q} es el caudal observado promedio anual y Q_{ci} es el caudal diario simulado; n es el número de días del año, y NY es el número de años. En el caso de la estación Manantali, los caudales se sustituyen por niveles en las ecuaciones (1) y (2).

Conclusiones

El desarrollo del módulo hidrogeomático como generador de información de entrada al modelo hidrológico distribuido *CEQUEAU* es una herramienta de gran utilidad, principalmente en el caso de grandes cuencas. El desarrollo de un algoritmo geomático para facilitar tareas que se acostumbraban hacer en forma manual ha permitido optimizar el proceso y considerar con mayor detalle la dimensión de la variabilidad espacial en las estimaciones. El módulo ha facilitado la reducción de incertidumbres y posibles errores humanos en la estimación de parámetros fisiográficos, además de permitir el uso de tecnología digital de mayor precisión, como

son las imágenes STRM. Los resultados obtenidos demuestran que por mucho tiempo las características fisiográficas fueron significativamente subestimadas. Tal es el caso del área de captación, la cual ha sido considerada en menos del 50% del área real. Este tipo de error no podía sino generar simulaciones hidrológicas inadecuadas, aun cuando la superficie ignorada corresponde a la parte más árida o desértica de la cuenca, y su contribución en el flujo es prácticamente nulo.

Cabe señalar que con base en la fuerte variabilidad climática presente en la zona, se considera imprescindible el uso de modelos hidrológicos distribuidos, tales como *CEQUEAU*, capaces de estimar caudales con una precisión razonable. De igual forma, los resultados de las simulaciones hidrológicas obtenidos, según el criterio de Nash, pueden ser considerados como ampliamente satisfactorios. La coincidencia entre los valores de caudales calculados y observados en las estaciones hidrométricas es definitivamente mejor que aquellas estimadas en los estudios previos reportados. Por ello, ante el análisis efectuado,

Cuadro 2. Resultados del criterio de Nash obtenidos en las simulaciones hidrológicas de caudales en las estaciones Bakel y Kayes, así como del nivel de almacenamiento en el embalse Manantali.

Año	Bakel	Kayes	Año	Bakel	Kayes	Manantali
1970	.854	.872	1988	.802	.849	.952
1971	.807	.902	1989	.826	.814	.545
1972	.778	.803	1990	.868	.893	.963
1973	.858	.939	1991	.890	.823	.860
1974	.971	.895	1992	.873	.904	.035
1975	.907	.752	1993	.885	.902	.346
1976	.898	.904	1994	.685	.793	-.42
1977	.850	.789	1995	.922	.939	.977
1978	.916	.841	1996	.749	.805	.985
1979	.772	.815	1997	.908	.921	.974
1980	.831	.797	1998	.693	.744	.245
1981	.916	.909	1999	.778	.678	.908
1982	.928	.908	2000	.936	.907	.723
1983	.772	.778				
1984	.843	.864				
NTD*	.962	.960	NTD*	.938	.972	.935

resulta necesario recomendar la revisión y optimización de la red climatológica de la zona, así como la verificación sistemática de la calidad de las bases de datos hidrometeorológicas.

Recibido: 23/06/11

Aceptado: 26/07/12

Referencias

- ANDERSEN J., REFSGAARD, J.C., and JENSEN K.H. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin-model construction and validation. *Journal of Hydrology*. No. 247, 2001, pp. 200-214.
- BÁ, K.M., DÍAZ-DELGADO, C. y RODRÍGUEZ, V. Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVI, núm. 4, 2001, pp. 117-126.
- COLY, A., AMENTORP, H.C., et DACOSTA, H. Étude sur la modélisation pluies/débits et pour la conception d'un système d'alerte précoce contre les inondations dans le haut bassin du fleuve Sénégal. Groupement Tropics DHI. Senegal: Pour l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal, OMVS, 2008.
- EASTMAN, J.R. *Idrisi Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing*. Worcester, USA: Clark Labs, Clark University, 2009.
- GUERRA-COBIÁN, V.H. *Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU*. Tesis de doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEM, 2007, 322 pp.
- MORIN, G.W. et PAQUET, P. *Le modèle hydrologique CEQUEAU*. 458p. Quebec: INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 2007.
- NASH, J.E. and SUTCLIFE, J.V. River flow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology*. Vol. 10, 1970, pp. 282-290.
- OMM. *Simulated real-time intercomparison of hydrological models*. Operational Hydrology Report No. 38. Geneva: World Meteorological Organization, 1992.
- SINGH, V.P. and FREVERT, D.K. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, USA: Water Resources Publications, LLC, 2002, 891 pp.

Abstract

BÂ, K.M., DÍAZ-DELGADO, C., QUENTIN, E., GUERRA-COBIÁN, V.H., OJEDA-CHIHUAHUA, J.I., CÂRSTEANU, A.A. & FRANCO-PLATA, R. *Hydrological modeling of large watersheds: case study of the Senegal River, West Africa, West Africa. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 2, April-June, 2013, pp. 129-136.*

The present paper is focusing on improving the rainfall-runoff modeling in a large basin, at a daily scale, using the distributed hydrological model CEQUEAU and the GIS IDRISI. A hydrogeomatic module was implemented using a supervised process to provide the input data required by the hydrological model. SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, USGS) images were used, with a spatial resolution of 30" (≈ 1 km), for the purpose of defining watershed divides, which eliminates significant sources of uncertainty and reduces processing times. On the other hand, the discharge of the Senegal River has been gauged at the Bakel hydrometric station since the beginning of the 20th century until today, so a relatively long time series of data is now available. Various hydrologic studies about this basin have been performed, reporting a watershed area of roughly 289×103 km², which is greatly underestimated according to the present study. The basin contains very diverse climatic conditions, with high variability in total annual precipitation, from 2 000 mm in the south to 50 mm in the north. Physiographic parameters have been computed taking into account the extensive area of the basin located in Mauritania, which had been neglected as part of this watershed by previous studies. Since the simulations of daily volumes for the period 1970-2000 produced good results (Nash coefficients generally above 0.80), it is concluded that simulations are more suitable when using the new hydrogeomatic module and the CEQUEAU and represent a solid basis for water resources management in the area.

Keywords: hydro-geomatic module, large watersheds, Senegal River, distributed model, GIS-IDRISI, CEQUEAU.

Dirección institucional de los autores

Dr. Khalidou M. Bà
Dr. Carlos Díaz-Delgado
M.C.A. Jaime Israel Ojeda-Chihuahua

Centro Interamericano de Recursos del Agua
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria
50130 Toluca, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (722) 2965 550
Fax : +52 (722) 2965 551
khalidou@uaemex.mx
cdiazd@uaemex.mx
israel_och@yahoo.com.mx

Dra. Emmanuelle Quentin

Centro Integrado de Geomática Ambiental / Centro de Recursos Idrisi
Universidad Nacional de Loja, ECUADOR
Ciudadela Universitaria "Guillermo Falconi Espinosa",
La Argelia
Casilla 1101 2636 o Casilla letra "S"
Loja, ECUADOR
Teléfono: + 59 (38) 1496 522
Fax: +59 (37) 2545 155
emmanuelle.quentin@gmail.com

Dr. Víctor Hugo Guerra-Cobián

Centro Internacional del Agua
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Ciudad Universitaria s/n, A.P. 58-F
66450 San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, MÉXICO
Teléfono: +52 (81) 83524 969, extensión 213
Fax: +52 (81) 83760 477
victor.guerrac@uanl.edu.mx

Dr. Alin Andrei Cârsteanu

Departamento de Matemáticas
Escuela Superior de Física y Matemáticas
Instituto Politécnico Nacional
Col. San Pedro Zacatenco
U.P. Adolfo López Mateos, Edificio 9
07738 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5729 6000, extensión 55011
Fax: +52 (55) 5586 2957
alin@esfm.ipn.mx

Dr. Roberto Franco-Plata

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria
50100 Toluca, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (722) 2150 255
Fax: +52 (722) 2143 182
rfp@uaemex.mx