

Título Artículo:

## “HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO DE LARGO PLAZO UTILIZANDO ARGIS 10.1”

Palabras clave: ArgGIS, Balance Hidrológico, Herramienta Computacional, Software.

### Antecedentes

Actualmente se adelantan distintos trabajos hidrológicos, para resolver problemáticas de ingeniería bajo diversas tecnologías. Una de las más conocidas es la consultoría, la cual hace uso de los sistemas de información geográfico (SIG)-según sea el caso - aplicando diferentes plataformas y desarrollo de lenguajes de programación. La casa “ESRI”, la más utilizada y distribuida a nivel mundial; por ejemplo, ha generado ArcGIS; que es una plataforma para el diseño y gestión de soluciones a través de la aplicación de los conocimientos geográficos; para la creación y el uso de mapas; elaboración de datos geográficos; análisis de la información asignada; difusión y descubrimiento de información geográfica, en una amplia gama de aplicaciones y gestión de la información geográfica en una base de datos.

Esta herramienta ArcGIS es de carácter comercial y tiene un costo de licenciamiento. En paralelo, otras entidades y empresas han ofrecido sistemas similares sobre plataformas de acceso libre, por ejemplo: MapWindow, GvSig, o Quantum SIG ofrecen soluciones geomáticas libres para la sostenibilidad de los proyectos que se desarrollen. Los sistemas de información geográfica se han dispuesto como herramientas en tecnologías que dinamizan la solución de problemas y generan conocimiento nuevo, partiendo de información geográfica conocida y han visto su aplicación a diferentes campos del desarrollo humano en muchas disciplinas del saber.

La hidrología, al relacionar datos geográficos, topográficos, geológicos, de drenajes, climatológicos, entre otros, ha visto en esta herramienta una línea de desarrollo e investigación con aplicaciones al manejo de recursos hídricos. Los SIG ofrecen herramientas mucho más precisas y rápidas con las cuales se estiman la distintas variables hidrológicas (longitud de la cuenca, área de captación, pendiente promedio, número de curva CN, tiempo de concentración, etc); por ejemplo, en el caso del ArcGIS se ha desarrollado modelo de datos geoespaciales y, temporal, llamado ArcHydro1, desarrollado para las aplicaciones de recursos de agua y obtiene datos para simulaciones hidrológicas; elaborado por el centro de investigaciones en recursos de agua (CRWR) de la Universidad de Austin Texas. ArcGIS utiliza componentes de la extensión Spatial Analyst de ArcGIS. ArcHydro, une el análisis espacial con los recursos de agua para trabajar juntos en un modelo de datos geoespaciales.

Mediante este avance progresivo se han generado otros procedimientos y herramientas específicos para manejo de recursos hídricos: la Modelación Geoespacial Hidrológica, extensión (HEC-GEOHMS) que ha sido desarrollada como un conjunto de herramientas de la hidrología geoespacial para ingenieros e hidrólogos con experiencia en GIS limitado. HEC-GEOHMS utiliza ArcView y la extensión Spatial Analyst para desarrollar una serie de entradas de modelos hidrológicos para el sistema de modelado hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica, HEC-HMS. ArcView GIS y su extensión Spatial Analyst están disponibles en el Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). HEC-GEOHMS analiza los datos digitales del terreno, transforma las líneas de drenaje y los límites de cuencas en una estructura de datos hidrológicos que representa la red de drenaje.

También encontramos el HEC-GeoRAS que ofrece un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para el procesamiento de datos geoespaciales en ArcGIS mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI). La interfaz permite la preparación de los datos geométricos para la importación en HEC-RAS2 y los resultados de

<sup>1</sup> ARCGIS RESOURCES CENTER. Hidrografía. Aguas superficiales. Estados Unidos. Disponible en Internet: <http://resources.arcgis.com/es/content//hydro/surface-water/about>

<sup>2</sup> DEPARTMENT OF THE ARMY CORPS OF ENGINEERS INSTITUTE FOR WATER RESOURCES. Hydrologic Engineering Center. 609 Second Street Davis, CA 95616-4687. Disponible en Internet: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>

simulación de procesos exportados de HEC-RAS. Para crear el archivo de importación el usuario debe tener un modelo digital del terreno existente (MDT) del sistema fluvial en el formato TIN ArcInfo.

La herramienta computacional para la estimación del balance hidrológico de largo plazo utilizando ARGIS 10.1", que presento, *tiene desarrollos y avances informáticos acordes a las tecnologías actuales* de la ciencias de la Geomática, que están a la vanguardia del desarrollo de los Sistemas de Información Geográficos (SIG); en tal sentido, fue construida empleando un modelo de add-in para ArcGIS desktop, este modelo provee un framework declarativo (.esriAddIn). La herramienta corresponde a una extensión para ArcMap (ArcMap Add-in). Esto permite a los add-ins proporcionar una visión simple y ligera para las personalizaciones más comunes de ArcGIS (botones, herramientas, cuadros combinados, barras de herramientas o de menú, ventanas acoplables y extensiones para la aplicación y el editor) y se pueden compartir mediante correo electrónico, carpetas compartidas en red y descargas públicas. (ESRI).

El add-in se generó con el lenguaje de programación C# del framework .Net, empleando la librería de objetos COM de ArcGIS llamada ArcObjects, el SDK de ArcObjects incluye un asistente para generar y actualizar los componentes del Add-In. Para las ediciones, actualizaciones, adiciones, mejoras y desarrollos; complementa otras versiones consecutivas. Esta herramienta tecnológica, brinda un avance científico sólido en consecuencia con la teoría de sistemas y la lógica de lenguaje, acorde con los requerimientos y necesidades actuales.

Dentro del presupuesto de ventajas y bondades, la herramienta fue creada para facilitar cálculos Hidrológicos en el entorno de ArcGIS 10.1. Es una plataforma robusta, económica en desarrollo de plan de negocios y por su gran aplicabilidad permite eficacia en términos de edición y visualización, representación cartográfica, administración de datos, geoprocetamiento, servicios, móvil, extensiones, soluciones industriales. También el add-in de Balance Hidrológico desarrolla el software de la plataforma con facilidad, provee funcionalidades para automatizar los procesos de generación de insumos intermedios tales como las grillas de evaporación y direcciones de flujo y cálculo de caudales medios por delimitación de cuenca y/o por acumulación.

La HERRAMIENTA surgió de la apremiante necesidad de uso sobre plataforma ESRI , en entorno de escritorio (ArcMap) y desarrollo (lenguaje C# .Net con la API de ArcGis – ArcObjects) , cuestión que no ofrece el HIDROSIG 4.0 y la plataforma libre Mapwindow, que tiene limitaciones de uso y requeriría un estudio y avance mayor en este sentido. La universidad nacional, sede Medellín ha realizado aportes en esta materia pero aún el HIDROSIG 4.0 Minimiza operatividad con tan solo una alternativa de uso. La herramienta computacional para la estimación del balance hidrológico de largo plazo utilizando ARGIS 10.1", oferta una nueva alternativa de modelación" hidrológica en plataforma casa ESRI.

Este trabajo contiene teorías, lógica de programación y desarrollo de software para sistemas de información geográfico aplicado a la hidrología y el reto de la sinergia con los temas geográficos y cartográficos de hoy en día aplicados al ejercicio propio de área: recursos hídricos y medio ambiente. Así mismo describe las funcionalidades y características del Add-In Balance Hidrológico, dando un enfoque técnico – teórico sobre su implementación.

Como referente técnico para la elaboración de la herramienta, se utilizó el estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, la interfaz básica HIDROSIG 4.0. A partir de lo anterior se creó y desarrollo "la herramienta computacional para la estimación del balance hidrológico de largo plazo versión 1.0". Esta herramienta fue creada para facilitar cálculos Hidrológicos en el entorno de ArcGIS, a través del addin de Balance Hidrológico, el cual provee funcionalidades para automatizar los procesos de generación de insumos intermedios y cálculo de caudales.

Se tomaron como parámetros los siguientes aspectos:

- Diseño ventana acoplable del Balance Hidrológico.
- Selector de Mapas.
- Integrador sobre polígonos.
- Algoritmo de Acumulación.
- Formulas del balance hidrológico de largo plazo.

Y se utilizaron formulas del balance hidrológico de largo plazo para la estimación de caudales (medios y extremos).

En la primera fase de obtención de la herramienta se analizó, diseñó y estructuró el código de programación en lenguaje C# .Net con la API de ArcGis – ArcObjects.

## ESPECIFICACIÓN EXTENSION BALANCE HIDROLOGICO

A continuación se presenta la descripción de la Extensión del modelo de clases el cual se divide en 10 Package.

1. Package AddIn
2. Package ArcGIS
3. Package Flow
4. Package Form
5. MapAlgebra Form
6. Package Operator
7. Package Polygon
8. Package Tracer
9. Package Util
10. Package Validate

Para la determinación de los "CAUDALES MEDIOS: EL MÉTODO DEL BALANCE HIDROLÓGICO DE LARGO PLAZO", sobre la estimación de caudales medios se utiliza el método del balance hidrológico a largo plazo, donde se supone que en un período de tiempo largo (décadas), la variación en el almacenamiento del suelo y la atmósfera es despreciable. El caudal medio en una cuenca se calcula como:

$$Caudal\ Medio = \int_{\text{Área Cuenca}} [P(x,y) - E(x,y)] dA$$

Donde, P(x,y) es la precipitación que recibe el punto (x,y) en el período considerado, E(x,y) es la lámina de agua que se pierde por evapotranspiración en el punto (x,y) en el mismo período, y dA es un diferencial de área de la cuenca.

### CAUDALES EXTREMOS: EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE EVENTOS EXTREMOS<sup>3</sup>

Los caudales extremos (mínimos o máximos) en una cuenca hidrográfica para diferentes periodos de retorno, pueden calcularse mediante la ecuación

$$Q_{Tr} = \mu + K_{Tr} \sigma$$

Donde, K es el factor de frecuencia que depende de la función de distribución de probabilidad de valores extremos elegida y del periodo de retorno

$Tr$ ,  $\mu$  es la media de los caudales extremos considerados (máximos o mínimos) y  $\sigma$  es la desviación estándar asociada al evento extremos considerado.

La media y la desviación estándar de los caudales máximos o mínimos dependen del área (A), la precipitación (P) y la evaporación (E), y pueden calcularse como:

$$\mu = c_{\mu} (\bar{P} - \bar{E})^{\phi_{\mu}} A^{\theta_{\mu}}$$

$$\sigma = c_{\sigma} (\bar{P} - \bar{E})^{\phi_{\sigma}} A^{\theta_{\sigma}}$$

Donde los parámetros C\_media ( $c_{\mu}$ ), C\_desv ( $c_{\sigma}$ ), Fi\_media ( $\phi_{\mu}$ ), Fi\_desv ( $\phi_{\sigma}$ ), Teta\_media ( $\theta_{\mu}$ ) y Teta\_desv ( $\theta_{\sigma}$ ), son parámetros regionalizados y diferentes para caudales máximos o para mínimos. Cabe resaltar y adicional a ello se realizó la obtención de las grillas o capas en formato raster, mediante la programación de línea de código fuente de "HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO DE LARGO PLAZO UTILIZANDO ARGIS 10.1" a través de algebra de mapas de: temperatura, evapotranspiración método de Turc, direcciones de flujo, acumulación o agregación de flujo, con su respectiva optimización y automatización de procesos que sugieren la disminución de tiempo para adelantar este proceso y las ventajas características del entorno ArcGIS 10.1.

Para el cálculo el mapa promedio anual de temperatura superficial del aire (T en °C) utilizando la siguiente relación con la altura (H en m sobre el nivel del mar):

$$T = 29.42 - 0.0061H$$

Para el cálculo del mapa de evapotranspiración real promedio anual (ETR en mm/año) empleando el método de Turc, el cual se describe a continuación:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{Si } P/L > 0.316.$$

$$ETR = P \quad \text{Si } P/L < 0.316$$

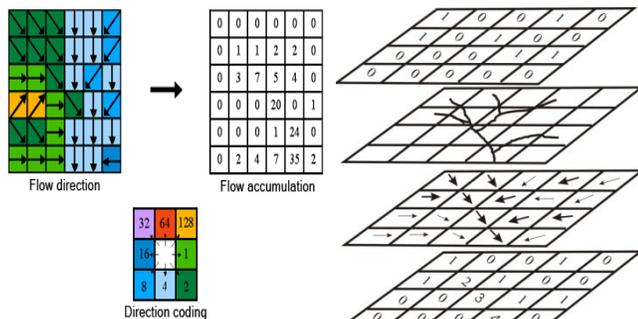
$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Donde, P es la precipitación media multianual (mm/año) y T la temperatura promedio anual (°C).

<sup>3</sup> ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE. UNIVERSIDAD NACIONAL. HIGROSIG 4.0. Medellín Colombia. Disponible en Internet: <http://www.mediclin.unal.edu.co/~hidrosig/>

Como se puede apreciar en las ecuaciones previas, para obtener el mapa de Evapotranspiración Real es necesario saber si la relación P/L es mayor o menor que 0.316.

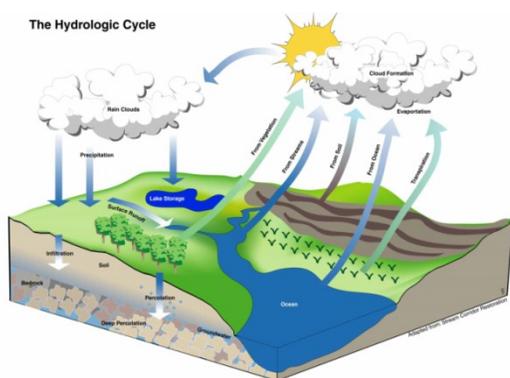
Para el cálculo de mapa direcciones flujo y acumulación o agregación de flujo el procedimiento se basa en sumar una variable discretizada en el espacio (precipitación, evaporación, caudales de demanda, etc), según el mapa de direcciones de drenaje. Este procedimiento se esquematiza en la Figura siguiente, donde se muestran en orden descendente: el mapa de la variable discretizada a agregar, el mapa que representa la red de drenaje, el mapa de direcciones de drenaje y el mapa de la variable agregada (mapa resultado).



Fuente: ArcGIS Resources Ayuda de ArcGIS 10.1 Acumulación de flujo – Modulo 3 - Curso de capacitación manejo Higgsig 4.0. Medellín Colombia.

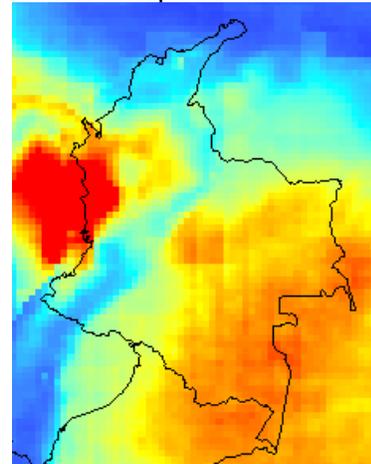
Proceso de agregación de variables siguiendo la estructura de la red de drenaje.

### Modelación distribuida



Fuente: TALLERES DE CAPACITACIÓN HIDROSIG 4.0 - (UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos).

### Ejemplo Grilla de Precipitación



Fuente: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TMM\\_DP/01\\_Data\\_Products/02\\_Gridded/](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TMM_DP/01_Data_Products/02_Gridded/)

ArcGIS Explorer incluye un kit de desarrollador de software (SDK). El objetivo del SDK es servir de apoyo a los desarrolladores para utilizar la interfaz de programación de la aplicación ArcGIS Explorer (API) y construir add-in's compatibles con la aplicación ArcGIS Explorer.

Diagramas de las clases de ArcGIS Explorer API (el espacio para el nombre de ESRI.ArcGISExplorer): Los diagramas de clase muestran las distintas clases que se exponen en ArcGIS Explorer API.

El modelo de clases el cual se divide en 10 Package, funciona y opera con la arquitectura y estructura de programación que obedece a la relaciones, atributos y operaciones entre clases, entidades, como cuerpo y alma del sistema de información que se desarrolla, el modelo proporciona a los desarrolladores un marco declarativa basada en la creación de bloques de funcionalidad personalizada en un solo archivo comprimido.

**AddInImpl:** Clase de implementación de la ventana acoplable del add-in. Es responsable de la creación y la eliminación de la clase de interfaz de usuario de la ventana acoplable.

Type: **Class**  
**ESRI.ArcGIS.Desktop.AddIns.DockableWindow**  
 Status: Proposed. Version 1.0. Phase 1.0.  
 Package: AddIn Keywords:

## Relaciones AddinImpl

TIPO	FUENTE	OBJETIVO	NOTAS
<b>Association</b> Source -> Destination	Public AddinImpl	Private m_windowUI HydrologicalBalanceDockWin	Usa la clase de interfaz de usuario de la ventana acoplable para crearla y eliminarla.

## Atributos AddinImpl

ATRIBUTO	LIMITACIONES Y ETIQUETAS
m_windowUI Private	HydrologicalBalanceDockWin <i>Default: Por defecto</i>

## Operaciones AddinImpl

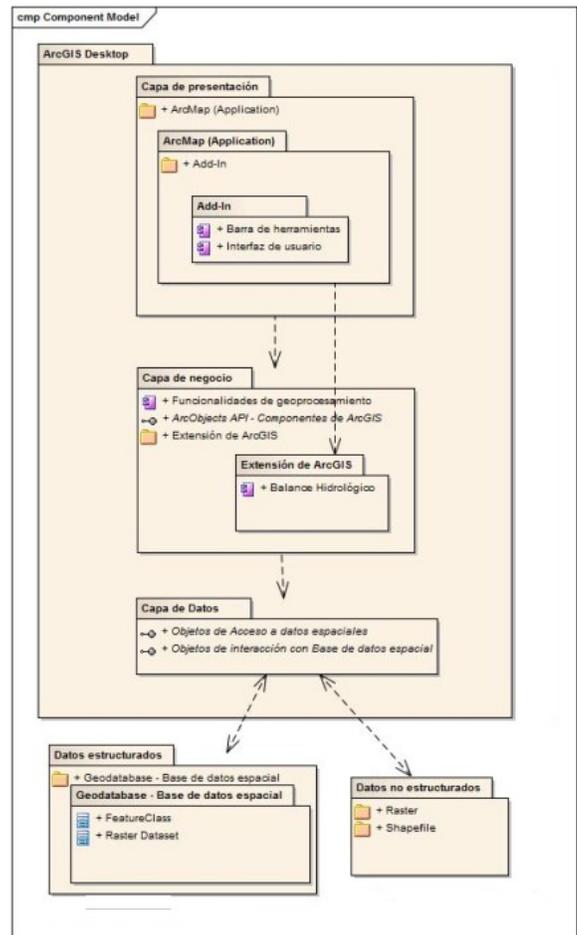
MÉTODO	PARÁMETROS
<b>AddinImpl()</b> Public	
<b>Dispose()</b> void Protected	<b>bool</b> [in] disposing
<b>OnCreateChild()</b> IntPtr Protected	

Aplicaciones ArcGIS<sup>4</sup> se construyen sobre un marco común y extensible conocido como ArcObjects. Puede agregar componentes personalizados para aplicaciones de ArcGIS, ampliando el marco de ArcObjects. Estos componentes personalizados pueden interactuar con otros componentes ArcObjects y añadir nuevas funcionalidades a las aplicaciones de ArcGIS. Ejemplos de los componentes personalizados que se pueden crear son herramientas, extracción de grasas, los símbolos cuentan, capas, personalizaciones editor, extensiones clase geodatabase y plug-in de fuentes de datos.

El componente personalizado se crea mediante el desarrollo de componentes de .NET (C # y VB.NET) o Java utilizando la interfaz de programación de aplicaciones ArcObjects apropiado (API). Los componentes personalizados deben estar COM visible y registrado a categorías específicas de componentes Esri. Además, la instalación de componentes personalizados requiere privilegios administrativos.

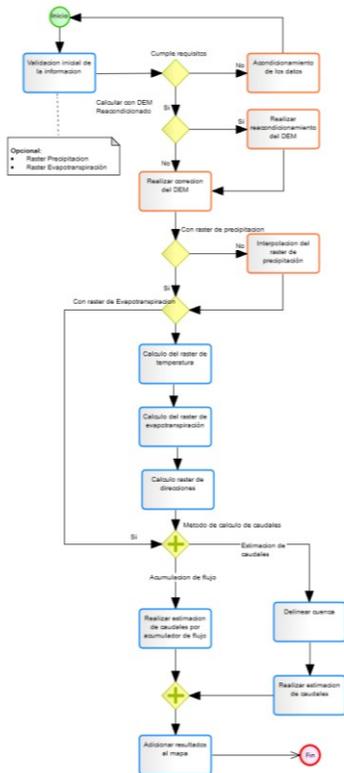
Las siguientes son las ventajas de los componentes personalizados:

- Puede crear componentes personalizados que son específicas de sus datos, de dominio o de organización, aprovechando el amplio espectro de las API de ArcObjects.
- Puede crear personalizaciones específicas de dominio y extensiones avanzadas. Algunas de las extensiones de ArcGIS, como la línea de producción de herramientas (PLTS) para ArcGIS son ejemplos de extensiones de aplicaciones avanzadas creadas por la ampliación del marco ArcObjects.
- Se puede entregar con facilidad a los usuarios finales a través de programas de instalación personalizados.



El diagrama de flujo declara la relación de los procesos con las relaciones de clase entidad – relación con sus atributos y operaciones. Para establecer el diagrama de flujo de la herramienta computacional es necesario definir el modelo de clases, que permita las herramientas condicionales de geoprocresamiento.

<sup>4</sup> ArcGIS. Resources - ArcObjects Ayuda para NET - <http://resources.arcgis.com/en/help/arcobjects-net/conceptualhelp/index.html#AddIns>



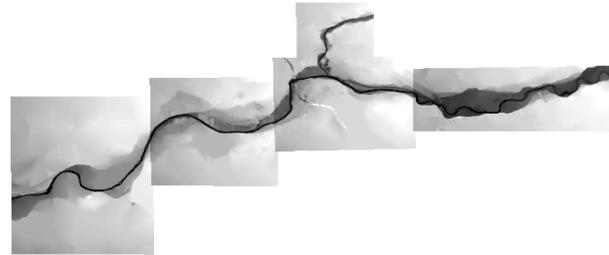
## REACONDICIONAMIENTO

- Método matemático bilineal
- Método matemático de reacondicionamiento del DEM
- Realizar corrección del Dem
- Corrección de sumideros
- Corrección de picos

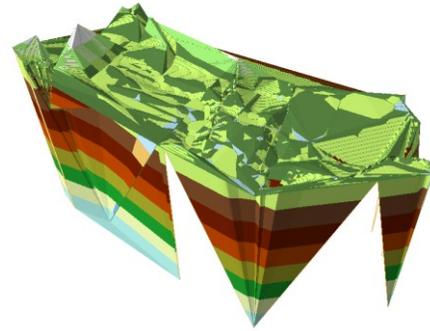
## CAPAS AUXILIARES

- Interpolación del raster de precipitación (spatial analyst)
- Cálculo del raster de temperatura (BARÓN, Alicia. Modelos geoespaciales de la distribución de las variables climatológicas en el territorio colombiano. Meteorol. Colombia-Universidad Nacional)
- Cálculo del raster de evapotranspiración Método de Turc)
- Polígono de delimitación de cuencas
- Grilla de estimación de caudales por polígono de cuenca
- Grilla de estimación de caudales por acumulación de flujo

## Modelo digital de elevación (DEM ó MDT)



Fuente : Propia – MDT.



Fuente: Propia MDT 3D

## Grilla de Direcciones de Flujo FDR

78	72	69	71	58	49	2	2	2	4	4	8
74	67	56	49	46	50	2	2	2	4	4	8
69	53	44	37	38	48	1	1	2	4	8	4
64	58	55	22	31	24	128	128	1	2	4	8
68	81	47	21	16	19	2	2	1	4	4	4
74	53	34	12	11	12	1	1	1	1	4	16
ELEVATION						FLOW_DIR					

ARCGIS/HYDROSHEEDS

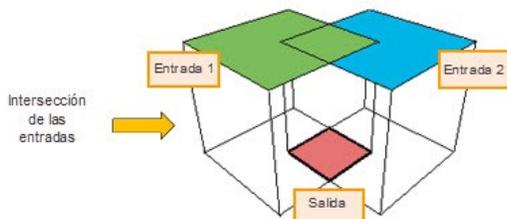
32	64	128
16	0	1
8	4	2

Fuente: ArcGis Resources - Dirección del flujo (Spatial Analyst) <sup>5</sup>

## VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE ENTRADA: Este proceso valida la estructura de la información en cuanto a:

- Formato (Raster y vector)
- Sistema de referencia (Raster y vector)
- Resolución Espacial (Raster)
- Extensión Espacial (Raster y vector)

## Validación de Extensión Espacial.



Fuente: ArcGis Resources - Extensión espacial de salida.

## CREACIÓN DEL DEM REACONDICIONADO Y CAPAS AUXILIARES

Este proceso se realiza usando una implementación del método AGREE desarrollado por el Centro de Investigación en Recursos Hídricos de la Universidad de Texas en Austin. Se encuentra implementado en la extensión ArcHydro de ArcGIS.

<sup>5</sup> ArcGIS. Resources - ArcObjects Ayuda para NET - <http://resources.arcgis.com/en/help/arcobjects-net/conceptualhelp/index.html#AddIns>

## DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SOLUCIÓN DEL DISEÑO EL MODELO DE ADD-IN PARA ARCGIS DESKTOP 10.1.

Un **add-in** es una personalización, como un conjunto de herramientas de una tabla de herramientas que se integra en una aplicación de ArcGIS for Desktop (es decir, ArcMap, ArcCatalog, ArcGlobe y ArcScene) con el fin de proporcionar funciones complementarias para la realización de tareas personalizadas.

La herramienta para la estimación del balance hidrológico de largo plazo fue construida empleando el **modelo de add-in para ArcGIS desktop**, este modelo provee un **framework declarativo** para crear una colección de personalizaciones empaquetadas dentro de un archivo comprimido (**.esriAddIn**). Específicamente la herramienta corresponde a una extensión para ArcMap (ArcMap Add-in).

El add-in se generó con el **lenguaje de programación C#** del **framework .Net**, empleando la librería de **objetos COM de ArcGIS llamada ArcObjects**, el **SDK de ArcObjects** incluye un asistente para generar y actualizar los componentes del Add-In.

A continuación se listan el software empleado en la implementación:

- **Microsoft Visual Studio 2010**
- **ArcObjects SDK for the Microsoft .NET Framework 10.1**
- **ArcGIS for Desktop (Con la extension Spatial Analyst)**

## DESARROLLO CON RASTER EN ARCGIS

A continuación se enuncian los casos de desarrollo relacionados con información raster empleados en la implementación del add-in Balance Hidrológico.

- **Accediendo y desplegando información raster:** workspace - (RasterWorkspaceFactory) - (FileGDBWorkspaceFactory) - **Método OpenWorkspace de la clase Raster- Metodo AddRasterLayer de la clase Map.**
- **Creando rasters usando pixel blocks:** objeto de tipo IRasterWorkspace2 - **Metodo CreateRaster de la clase Raster**
- **Procesando datos raster:** mediante el álgebra de mapas - **Clase CaudalAlgebra**

## DESARROLLO DE SIG APLICADOS A LA INGENIERIA DE RECURSOS HIDRICOS Y AMBIENTAL<sup>6</sup>:

El Conjunto herramientas y actividades que actúan coordinada y sistemáticamente para recolectar, almacenar, validar, actualizar, manipular, integrar, analizar, extraer, y desplegar información, tanto gráfica como descriptiva de los elementos considerados, con el fin de satisfacer múltiples propósitos.

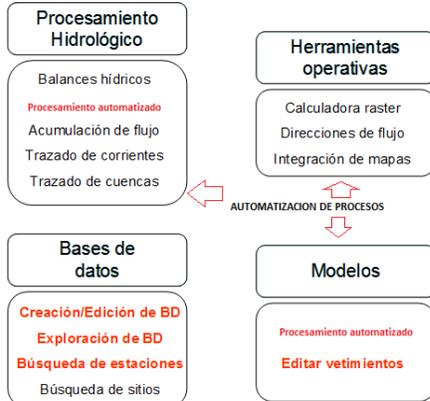
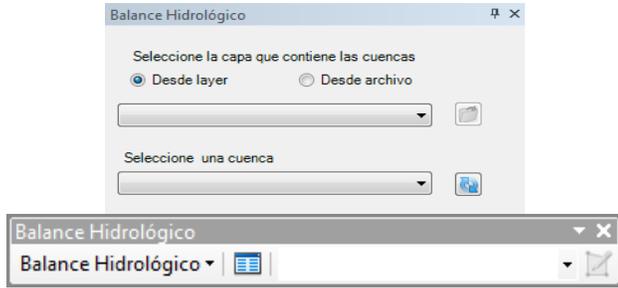


## COMPARATIVO DE HIDROSIG 4.0 y el ADD-IN



<sup>6</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Talleres de capacitación Hidrosig 4.0

## ADD-IN ARCGIS



### Funcionalidades del menú Balance Hidrológico

BOTON	NOMBRE	FUNCIÓN
	Balance Hidrológico	Muestra/oculta la ventana acoplable del Balance Hidrológico

NOMBRE	FUNCIÓN
Validar Información	Informa sobre posibles errores o advertencias en la información de entrada de las demás funcionalidades del menú.
Nuevo Raster Temperatura	A partir de información de elevación genera un raster de Temperatura.
Nuevo Raster de Evapotranspiración	Genera un raster de Evapotranspiración por el método de Turc.
Nuevo Raster de Direcciones de Flujo	Genera un raster de Direcciones de Flujo con una estructura determinada para el uso en la extensión Balance Hidrológico.
Acumulador de Flujo	Genera un raster que contiene los valores acumulados de caudales medios.

## ESTUDIO DE CASO – CUENCA ARROYO LAS ANIMAS – DEPARTAMENTO DEL CESAR

El estudio de caso es el mecanismo y la manera en que el elemento o *“Herramienta Computacional Para La Estimación Del Balance Hidrológico De Largo Plazo”*, se somete a prueba de validación sobre funcionalidad y demuestra su uso en sistemas de información geográfico a través del desarrollo de software en plataforma ESRI en el *“Addin Balance Hidrológico ArcGIS 10.1”*. Para ello se utilizó una serie de pruebas de agitación ensayo - error, para depurar el desarrollo del código fuente de programación (Diseño ventana acoplable del Balance Hidrológico, Selector de Mapas, Integrador

sobre polígonos, operador, mapa de algebras, flujos, Algoritmo, Formulas y relaciones del balance hidrológico de largo plazo, entre otros). Hasta su consecución, en 7 versiones de línea de código hasta llegar viabilizada.

Es importante resaltar y mencionar que para la comprobación del cien por ciento (100%) de la herramienta desarrollada y teniendo presente que para el estudio de caso no se tenía la información de los parámetro regionalizados de  $C_{media}$  ( $c_{\mu}$ ),  $C_{desv}$  ( $c_{\sigma}$ ),  $Fi_{media}$  ( $\phi_{\mu}$ ),  $Fi_{desv}$  ( $\phi_{\sigma}$ ),  $Teta_{media}$  ( $\theta_{\mu}$ ) y  $Teta_{desv}$  ( $\theta_{\sigma}$ ), se realizó dicha comprobación utilizando la *“HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO DE LARGO PLAZO UTILIZANDO ARGIS 10.1”*, y los Datos del Modulo 3 - Estimación de Caudales Hidrosig 4.0. Ello con el fin de lograr y comprobar por este medio la estimación de caudales Máximos para esas grillas o capas.

### **“CUENCA ARROYO LAS ANIMAS – DEPARTAMENTO DEL CESAR”**

La Cuenca arroyo *“LAS ANIMAS”*<sup>7</sup> localizada en el municipio de Chiriguana departamento del Cesar se caracteriza por tener un relieve con pendientes que van desde planas hasta onduladas, sobre las cuales descansan innumerables ciénagas y pantanos, características que permiten en la zona condiciones climáticas muy homogéneas.

Características generales de las estaciones climáticas del municipio según el IDEAM.

ESTACION	TIPO	CÓDIGO	CORRIENTE	COORDENADAS	ELEVACIÓN MSNM
Chiriguana	Co	2502525	Ariguana	0923 N 7336 W	40
Poponte	Pm	2502069	Q. La Mula	0925 N 7320	500

La hidrología en el territorio municipal se encuentra surcado por los afluentes que conforman la cuenca del Río Cesar y aquellos que conforman la subcuenca de los ríos la Mula, Anime, Arroyo San Antonio, Caño Similoa, Paraluz y Ciénagas, las cuales en su conjunto forman parte del complejo cenagoso. Las cuencas hidrográficas en el municipio pertenece a la red hidrográfica de la margen oriental del río Cesar, la cual está formada por un sistema de ciénagas, cuencas y subcuencas que nacen y captan sus aguas en la vertiente

<sup>7</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA. IDEAM. Sistema Biofísico. Chiriguana. Disponible en Internet: [http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/biof/C3%ADsico\\_c hiriguana% C3%A1\\_\(88\\_pag\\_234\\_kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/biof/C3%ADsico_c hiriguana% C3%A1_(88_pag_234_kb).pdf)

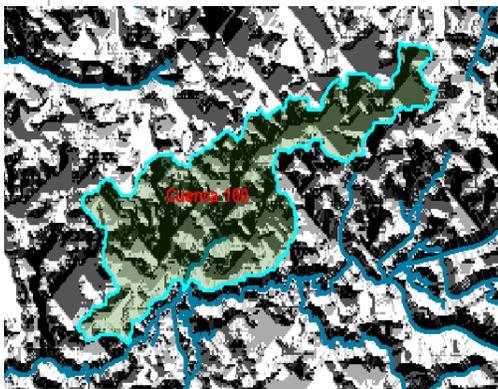
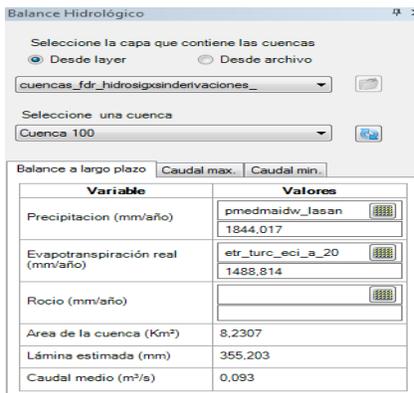
occidental de la cordillera oriental drenando la zona noreste del municipio.

Tomando como punto de partida la información cartográfica digital dispuesta para el estudio de caso de esta región en particular, lo primero que se realiza es la configuración de la Herramienta Computacional correctamente "Para La Estimación Del Balance Hidrológico De Largo Plazo - HydrologicalBalance".

**Balance Hidrológico a largo plazo estudio de caso Las Ánimas:** Se estimó caudales medios empleando el método del balance hidrológico de largo plazo a la salida de una cuenca previamente trazada. Tiene como insumos los raster de precipitación y evapotranspiración. Para cada uno de estos se realizan análisis estadísticos (sumatoria de la variable, valor medio, mínimo y máximo) para los píxeles que se encuentran dentro del área que delimita la cuenca de entrada. Con las estadísticas calculadas se realiza la estimación del caudal medio dada la siguiente fórmula:

$$3.171E-05 * \text{BasinArea} * (\text{Precipitation.mean} - \text{Evaporation.mean})^8$$

Ventana desplegable Balance Hidrológico



indicando en la siguiente tabla las coordenadas (x, y, z); luego se realiza el balance hidrológico con las grillas suministradas por la Escuela Colombiana Ingeniería y se efectúa el cálculo completo utilizando HydroSIG y el Add-in.

Se presenta una tabla de comparación de los resultados obtenidos para los puntos.

Punto 01			
Addin		HidroSIG 4.0	Diferencia
X	1.055.063.148	X	1.055.063.148
Y	1.544.847.784	Y	1.544.847.784
Z	129	Z	129
0,000971			

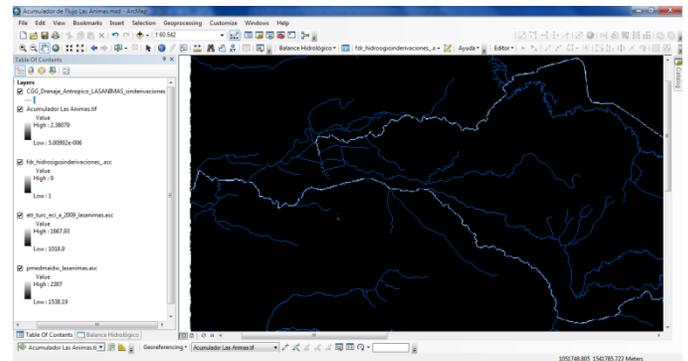
  

Punto 02			
Addin		HidroSIG 4.0	Diferencia
X	1.051.138.794	X	1.051.138.794
Y	1.544.333.704	Y	1.544.333.704
Z	170	Z	170
0,001339			

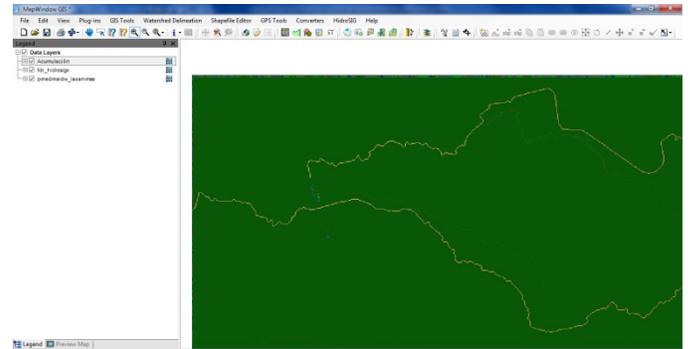
Punto 03			
Addin		HidroSIG 4.0	Diferencia
X	1.050.892.549	X	1.050.892.549
Y	1.543.720.954	Y	1.543.720.954
Z	173	Z	173
0,00136			

Resultados ADD-IN ARCGIS



Fuente: Propia.

Resultado HIDROSIG 4.0



Fuente: Propia.

Para el estudio de caso, de la cuenca del arroyo Las Animas se identificaron 3 puntos diferentes

Las diferencias se basan sobre los datos de acumulación de cada punto después de realizar el balance hidrológico obtenido de AddIn Vs Hidrosig 4.0.

<sup>8</sup> UNIVERSIDAD NACIONALSEDE MEDELLIN. Curso de Capacitación Hidrosig 4.0 Modulo 3- estimación de caudales.

Punto1.0 (2.471193, 2.470222) m<sup>3</sup>/s

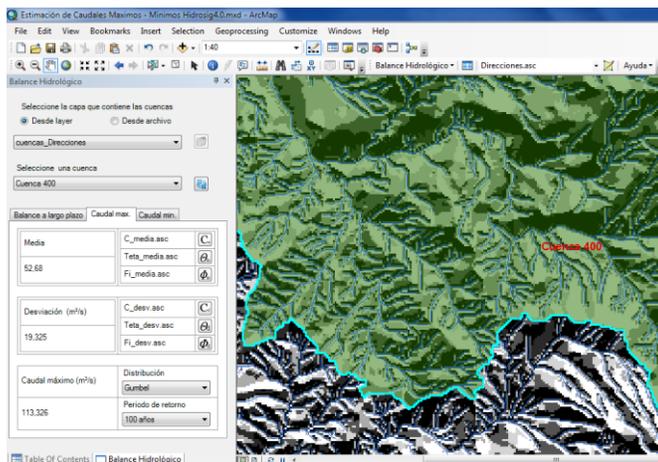
Punto 2.0 (2.307074, 2.305735 ) m<sup>3</sup>/s

Punto 3.0 (2.338800, 2.337440) m<sup>3</sup>/s

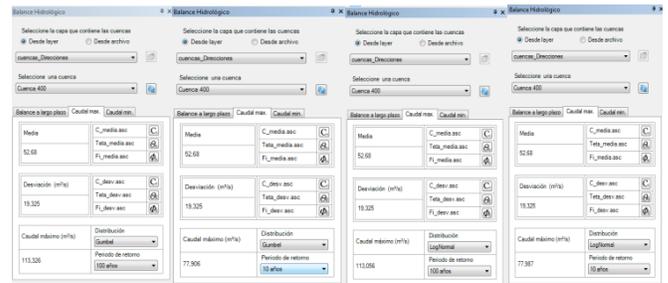
Su diferencia radica en el raster de direcciones suministrado tiene algunos pixeles con valores "no data", entonces se controló la acumulación en el Addin en dichos pixeles sea cero.

**Caudal Máximo Y Mínimo Estudio De Caso Las Animas:** Para la estimación de este ítem, se establece que no se suministro las grillas (Las Animas) requeridas por los cual lo realizamos utilizando los datos de la capacitación para el manejo y uso de HIDROSIG 4.0 Modulo 3 – Estimación de Caudales. A continuación se presentan los procedimientos y procesos para el desarrollo del ejemplo. Para estimar caudales máximos y mínimos para capa diferentes periodos de retorno en diferentes cuencas hidrográficas se debe considerar lo siguiente. Nota 1: Para este cálculo es necesario que se encuentre calculado el caudal medio previamente.

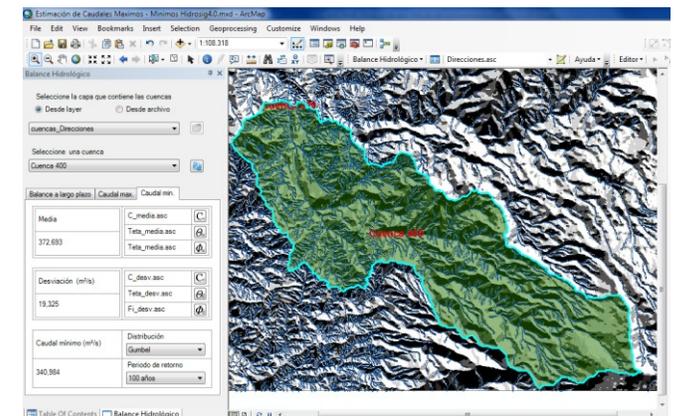
Se presenta a continuación "Caudal Extremos" Usando La Herramienta Computacional "Balance Hidrológico" Arcgis 10.1. Estimación De Caudal Máximo, Distribución Gumbel Para Periodo De Retorno 100 Años.



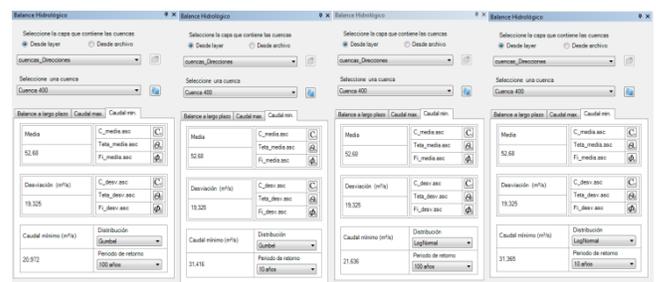
Se presenta a continuación "Caudal Extremos" Usando La Herramienta Computacional "Balance Hidrológico" Arcgis 10.1. Estimación De Caudal Máximo, Distribución Gumbel, LogNormal Para Periodo De Retorno 100 y 10 Años.



Se presenta a continuación "Caudal Extremos" Usando La Herramienta Computacional "Balance Hidrológico" Arcgis 10.1. Estimación De Caudal Mínimo, Distribución Gumbel Para Periodo De Retorno 100 Años.



Se presenta a continuación "Caudal Extremos" Usando La Herramienta Computacional "Balance Hidrológico" Arcgis 10.1. Estimación De Caudal Mínimo, Distribución Gumbel, LogNormal Para Periodo De Retorno 100 y 10 Años.



## CONCLUSIONES

La herramienta para la estimación del balance hidrológico de largo plazo (código "HydrologicalBalance") es una herramienta computacional que se creó con el apoyo de la ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO, a nivel de maestría en Ingeniería Civil, con Énfasis En Recursos Hidráulicos Y Medio Ambiente en el Centro De Estudios Hídricos, con el propósito de realizar una propuesta de desarrollo

en sistemas de información geográfico (SIG) aplicado a la ingeniería civil para optimizar y automatizar procesos de manejo de recursos hidrológicos y geográficos, accesible a no programadores, a ingenieros que manejan temas de avanzar en futuras investigaciones de recursos hídricos, y no tienen una amplia experiencia y manejo de SIG, específicamente en el manejo de ArcGIS en versión 10.1 en adelante.

Evidentemente el punto de partida de experiencias exitosas de la herramienta propuesta, fue fundamentado e influenciado por la Universidad Nacional sede Medellín, Escuela de Geociencias y medio ambiente a través de Hidrosig 4.0.

Este trabajo ofrece una propuesta inicial de desarrollo en la plataforma ESRI, con el firme propósito de avanzar en nuevas implementaciones, tomándolo como árbol de necesidades para los consecutivos módulos que se acoplen a este. Teniendo como insumo el aporte de la teoría lógica de programación y el código generado.

La herramienta computacional creada, supera las limitaciones informáticas más apremiantes, es una aplicación de avances tecnológicos, para enfrentar y atender otros retos teóricos actuales geomáticos. Además constituye una mejora notable en automatización y optimización de procesos como por ejemplo la teoría algebra de mapas y geoestadística incorporados en esta propuesta y declaradas en las líneas de código "HydrologicalBalance".

El código fuente de la "Herramienta Computacional Para La Estimación Del Balance Hidrológico De Largo Plazo Versión 1.0, en ArcGis 10.1" está abierto a todas las modificaciones, actualizaciones, desarrollos y mejoras, tales como la inclusión de métodos alternativos para la generación de grillas de evapotranspiración, temperaturas entre otros aspectos de interés.

## BIBLIOGRAFÍA

DEPARTMENT OF THE ARMY CORPS OF ENGINEERS INSTITUTE FOR WATER RESOURCES. Hydrologic Engineering Center. 609 Second Street Davis, CA 95616-4687. Disponible en Internet: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ra>

ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE. UNIVERSIDAD NACIONAL. HIGROSIG

4.0. Medellín Colombia. Disponible en Internet: <http://www.medellin.unal.edu.co/~hidrosig/>

UNIVERSIDAD NACIONAL SEDE MEDELLÍN Y EPM AGUAS. Estudio de Oferta y demanda hídrica. 2004.

ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE. UNIVERSIDAD NACIONAL. Manual software HIGROSIG 4.0. Medellín Colombia. Disponible en Internet: <http://www.medellin.unal.edu.co>

POVEDA, G., JI VÉLEZ, DO MESA, Y CO-AUTORES. Vinculación Balances Hídricos a largo plazo y de escala estadística para estimar los flujos del río a lo largo de la red de drenaje de Colombia. . Revista de Ingeniería Hidrológica, ASCE, 12 (1), 4-13, enero-febrero 2007

POVEDA, G., DO MESA, JI VÉLEZ, Y CO-AUTORES. Hidrosig: Un atlas digital interactivo de Colombia hidro-climatología, Diario de Hidroinformática, 9 (2), 145-156, 2007.

ESRI. Novedades en ArcGIS 10.1. Copyright © 1995-2012 Esri. Todos los derechos reservados. Disponible en Internet: <http://www.gep.uchile.cl/Biblioteca/SIG/whatsnewinarcgis.pdf>

ESRI. Support ArcGIS 10.1. Copyright © 1995-2012 Esri. Todos los derechos reservados. Disponible en Internet: <http://support.esri.com/en/knowledgebase/Gisdictionary/browse>

BARÓN, Alicia. Modelos geoespaciales de la distribución de las variables climatológicas en el territorio colombiano. Meteorol. Colomb. 7:81-89. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia. 2003. Disponible en Internet: [http://www.geociencias.unal.edu.co/Unciencias/data-file/user\\_23/file/METEOROLOGIA/08%20BARON%20MODEL.pdf](http://www.geociencias.unal.edu.co/Unciencias/data-file/user_23/file/METEOROLOGIA/08%20BARON%20MODEL.pdf)