

## DETERMINACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA PADRE DE JESÚS, BOGOTÁ DC.

SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN DESARROLLO, RURALIDAD Y MUNICIPIO  
PROYECTO CURRICULAR DEL SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN TECNOLOGÍA EN GESTIÓN  
AMBIENTAL Y SERVICIOS PÚBLICOS  
PROYECTO CURRICULAR ESTUDIANTES INGENIERÍA SANITARIA

**Autor (es):** Laura Michele Pérez Cruz - lauraperezcruz29@gmail.com

Laura Catalina Rubio Calderón - laura.rubio7@gmail.com

**Docente director:** Jorge Alberto Valero Fandiño

### PALABRAS CLAVE:

Caudal, Hidrograma Unitario, Limnígrafo, Precipitación, Vertedero Triangular.

*“En el presente trabajo se calculó el Hidrograma Unitario (HU) por los métodos sintéticos: triangular y curvilíneo y por el método matricial basado en mediciones de campo para la Quebrada Padre de Jesús, Bogotá D.C, con el fin de determinar la validez de los métodos sintéticos actualmente utilizados.”*

**Fotografía** Equipos de medición



**Descripción:** Instalación y funcionamiento de un sistema de medición conformado por un Limnigrafo - Limnómetro y Vertedero Triangular de pared delgada elaborados por las estudiantes, para la medición continua en campo de caudal y altura del nivel del agua principalmente al presentarse fuertes lluvias en la Quebrada Padre de Jesús Bogotá D.C, cuyo tramo cruza por el costado sur de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; con el fin de predecir el compartimento de la misma ante dichos eventos.

## CONTEXTO

A nivel nacional se han realizado diversos estudios sobre la generación de Hidrogramas. Inicialmente en la ciudad de Ibagué en el año 2006 se generó un Hidrograma Sintético teniendo como base la metodología del Soil Conservation Service (SCS) y un Hidrograma analítico basado en las mediciones de campo para el flujo torrencial ocurrido el 22 de junio de 2006 en la micro cuenca El Salto, afluente del río Combeima en el municipio de Ibagué Tolima (Barrios & Olaya, 2007). Adicionalmente, con la utilización de la modelación hidráulica se trabajó en dos zonas de Colombia: la primera corresponde al modelo MG implementado en Antioquia y el Eje Cafetero para la estimación de los caudales máximos y su comparación con otras metodologías de diseño hidroló-

gico con información escasa (Escuela de geociencias y medio Ambiente, 2005); mientras que la segunda zona corresponde a la aplicación en un sector de río caudaloso (Magdalena) con derivaciones, empleando HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System). Dicho trabajo se ejecutó teniendo en cuenta las mediciones de campo realizadas en junio de 2005, junto con los registros hidrométricos de caudal y nivel en dos estaciones Calamar en el Río Magdalena e INCORA K7 en el Canal del Dique (Santos, 2008).

A nivel internacional, existen numerosos estudios referidos a la modelación de hidrogramas unitarios sintéticos (HUS). Jena & Tiwari (2006).

Lograron ajustar el HUS de Snyder (1938) en la modelación de crecidas de cuencas subtropicales, a partir de datos de dos cuencas agrícolas de la zona este de India. Por otra parte, Usul & Kupcu (1997) con el uso de Sistemas de Información Geográfica, ajustaron los parámetros del Hidrograma unitario (“Soil Conservation Service”) a las cuencas del noroeste de Turquía, como respuesta a la carencia de modelos para determinar los caudales de diseño en obras hidráulicas. Además, López, Gimena, & Aguirre (2005) propusieron y analizaron, con resultados satisfactorios, un método para la obtención de HU, desarrollado bajo una cuenca de uso agrícola.

Finalmente, en el 2011 en la cuenca de la Quebrada Padre de Jesús se realizó un estudio Físico-Químico para definir las características particulares como consecuencia de la intervención y ocupación antrópica. En el estudio se realizaron mediciones de caudal a través del aforo volumétrico en la parte alta y baja de la quebrada, obteniendo un valor de caudal promedio de 3 L/min (Patiño & Osorio, 2011).

## JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la Quebrada Padre de Jesús carece de estudios que comprueben si el cálculo del HU a través de métodos sintéticos y los fundamentados en mediciones de campo presentan diferencias significativas que permitan determinar su aplicabilidad, teniendo en cuenta las características propias de la unidad hidrológica de estudio.

Los HU permiten establecer la relación lluvia-escorrentamiento, es decir se determina la respuesta de un cuerpo hídrico en términos de caudal frente a un evento de precipitación (Aparicio, 2015). La aplicación de los métodos sintéticos induce un alto nivel de incertidumbre que puede incidir en posibles sobrecostos en el dimensionamiento de obras hidráulicas, aun cuando estos métodos contribuyen en el cálculo de los HU para cuencas sobre las cuales no se tiene información.

Por otra parte, se encuentran los métodos fundamentados en las mediciones de campo, en donde a través de los aforos de caudal y datos de precipitación específica se obtienen los HU, sobre los cuales su aplicación es

limitada. Por lo anterior, se hace necesaria la aplicación de ambas metodologías con el fin de realizar un análisis comparativo entre los métodos basados en infamación de campo y los métodos sintéticos para establecer las principales diferencias entre ambas metodologías.

## DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

### Área de estudio

La Quebrada Padre de Jesús se ubica en los cerros orientales en Bogotá, en la localidad de Santafé, formando parte de la cuenca del Rio Fucha. La Quebrada nace a una altura aproximada de 2898 msnm y después de un recorrido aproximado de 1 km desde su nacimiento sus aguas son canalizadas a una altura de 2675 msnm (Patiño & Osorio, 2011). La estación de medición de caudales instalada en este estudio en la Quebrada Padre de Jesús con coordenadas geográficas  $4^{\circ}35'48.37''N$  y  $74^{\circ}03'53.02''W$  en una elevación aproximada de 2750 m (Google Earth, 2017), con punto de cierre en la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

### Metodología

Durante la realización del presente trabajo se

ejecutaron cinco fases:

#### 1. Recopilación de información

Se realizó la búsqueda de información relacionada con los antecedentes de la temática a trabajar en el estudio de caso, como la aplicación de HU a nivel internacional, nacional y local. Así como también una búsqueda de las investigaciones que tuvieran relación con la Quebrada Padre de Jesús.

#### 2. Determinación de variables funcionales y datos que alimentan los modelos

Se determinó que con la información disponible se procedería a calcular el HU para la cuenca con los métodos sintéticos: triangular y curvilíneo y el método matricial basado en mediciones de campo sugeridos y desarrollados ampliamente en los textos de hidrología aplicada de algunos autores como Aparicio (2015) y Chow, Maidment, & Mays (1994), por lo que fue necesario recopilar la información de las variables requeridas por cada uno de los métodos y realizar su cálculo.

### 3. Mediciones del nivel de la lámina de agua

Se realizó la medición de la sección transversal de la quebrada, determinando que el ancho del canal fue de 90 cm. Con este valor y los datos de aforos de caudal de los estudios de Patiño & Osorio (2011) y Rodríguez (2013) realizados en la Quebrada Padre de Jesús, se realizó el diseño del vertedero triangular de pared delgada.

Adicionalmente, como las mediciones debían ser continuas, se construyó un limnígrafo para facilitar la captura de los datos, registrando en papel milimetrado de manera continua e integrada la información de las variaciones en el nivel del agua durante los eventos de precipitación que se presentaran en un periodo de 24 horas.

Los instrumentos de medición de caudal fueron instalados desde el 1 de abril hasta el 8 de mayo de 2017; período en el que diariamente se cambió el papel milimetrado que graficó el nivel del agua de manera continua y también se retiró el material de arrastre depositado en el lecho de la quebrada el cual era retenido por el

vertedero triangular, lo anterior con el fin de no alterar las medidas de altura del agua graficadas por el limnígrafo.

Las gráficas que registraron las tormentas fueron escaneadas y digitalizadas en AutoCAD 2016. Posterior al ajuste y digitalización, las curvas obtenidas se exportaron al programa Excel 2013 las coordenadas (X: Tiempo; Y: altura del agua en cm) para iniciar con la fase de cálculo.

### 4. Cálculo de Hidrogramas unitarios

Para el cálculo de los HU, se procesó y analizó la información obtenida en campo de la estación de medición de caudal. Las gráficas del nivel del agua fueron el insumo principal, sobre las cuales se realizó la separación del caudal base y caudal de exceso por los métodos de Maillet (Diez, 2012), línea recta y análisis de las curvas de recesión (Aparicio, 2015). De forma paralela se hizo una síntesis de los datos de precipitación obtenidos a través de la estación “Guadalupe” a cargo del IDIGER, extrayendo la información de las tormentas de los días 3, 4 y 5 de

mayo de 2017, para posteriormente de manera integrada con los datos de caudal construir las matrices inversas y transpuestas para la obtención del HU. Finalmente se realizó el cálculo de las variables requeridas para los métodos sintéticos. Para todos los métodos se realizaron las gráficas correspondientes a los HU hallados y éstos fueron puestos a prueba para reconstruir las tormentas de los días 3-4 y 4-5 de mayo de 2017, calculando la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC), usado como criterio de selección del mejor método aquel cuyo REMC se aproximaba a cero (0).

#### 5. Análisis de resultados

En el presente trabajo, se calculó el Hidrograma Unitario por los métodos sintéticos (triangular y curvilíneo) y por el método matricial basado en mediciones de campo. Así mismo se realizó un análisis comparativo que permitió establecer las principales diferencias en su aplicación para el caso de estudio. Obteniendo como principal resultado el Hidrograma Unitario para la cuenca de la Quebrada Padre de Jesús a través de las mediciones en campo.

## Resultados

Con los datos de altura reportados por los instrumentos de medición de caudal se obtuvieron los caudales usando la **Ecuación 1**, donde H representa la carga sobre la cresta del vertedero (m) y el caudal (Q) se expresa en m<sup>3</sup>/s, posteriormente estos valores fueron interpolados para ser presentados cada cinco minutos (Valero, 2017) tal como se encuentran los datos de precipitación de la estación.

$$Q = 1,49 \times H^{2,48}$$

### Ecuación 1

Para la separación del caudal base y caudal de exceso se usó el método de la línea recta. Por otra parte, tras analizar los usos y tipos de suelo de la cuenca de estudio se llegó a la conclusión de que el número de curva “CN” ponderado tenía un valor 73,47.

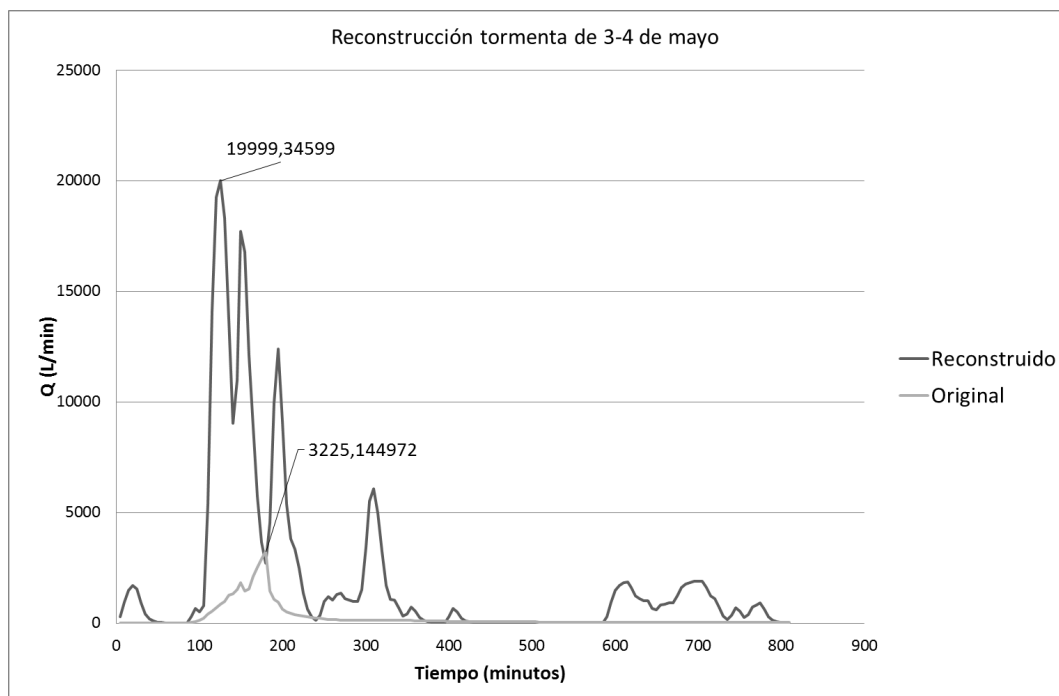
Para la aplicación de los métodos sintéticos se calculó un tiempo de concentración ponderado “Tc” de 15,68 minutos por 11 de los modelos propuestos en el manual de drenaje para carreteras (Instituto Nacional de Vías, 2009).

### Métodos sintéticos

El Hidrograma real resultante de la tormenta del 3-4 de mayo de 2017 es presentado en la Figura 1 en color gris claro. Por otra parte, el Hidrograma resultante al aplicar el HU sintéti-

co curvilíneo se muestra en color gris oscuro. Nótese, que al aplicar el HU sintético se sobreestiman los valores de caudal.

**Figura 1:** reconstrucción de tormenta del 3-4 de mayo a partir de HU sintético



**Fuente:** autores

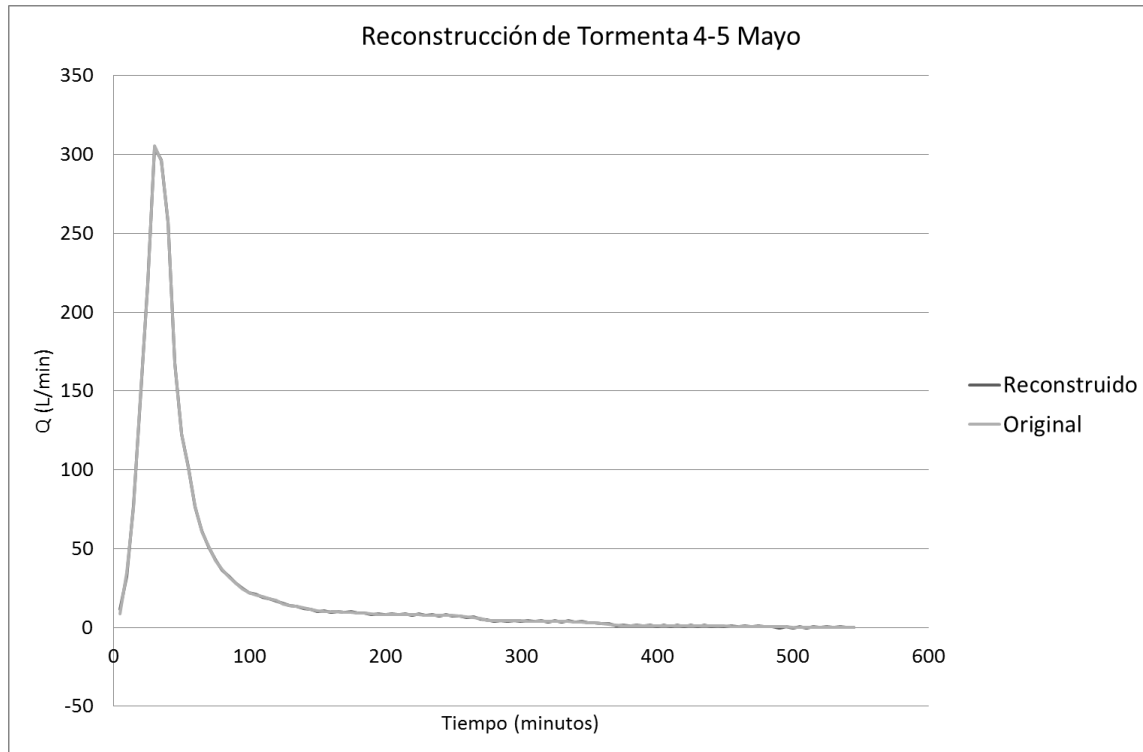
### Método matricial inicial

Se usó el HU matricial inicial en la reconstrucción de la tormenta del 4-5 de mayo de 2017 mostrado en la Figura 2, el cual muestra mejores resultados en la predicción para todas las

variables, arrojando un REMC de 0,54 L/min, siendo éste el más bajo en comparación con los métodos sintéticos aplicados.

**Figura 2:** reconstrucción de tormenta del 4-5 de mayo a partir de HU matricial inicial

**Figura 2:** reconstrucción de tormenta del 4-5 de mayo a partir de HU matricial inicial



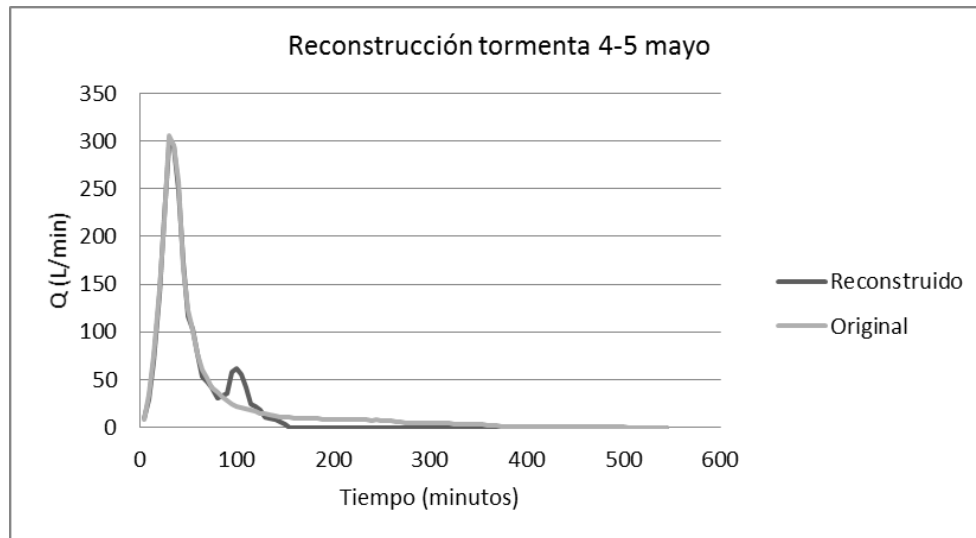
**Fuente:** autores

Es importante señalar, que para determinar el mejor HU sintético fue necesario calcular 30.000 HU automáticamente. Inicialmente se obtuvieron errores entre 144, 29, 16 y 14 L/min hasta finalmente llegar a encontrar la reconstrucción de la tormenta del 4-5 de mayo

con un HU que presentó un error de 7,99 L/min, lo que significa que en promedio el HU es capaz de predecir la respuesta de una tormenta con un error de 7,99 litros por cada minuto, como se observa en la Figura 3.



**Figura 3:** reconstrucción de tormenta del 4-5 de mayo a partir de HU ajustado



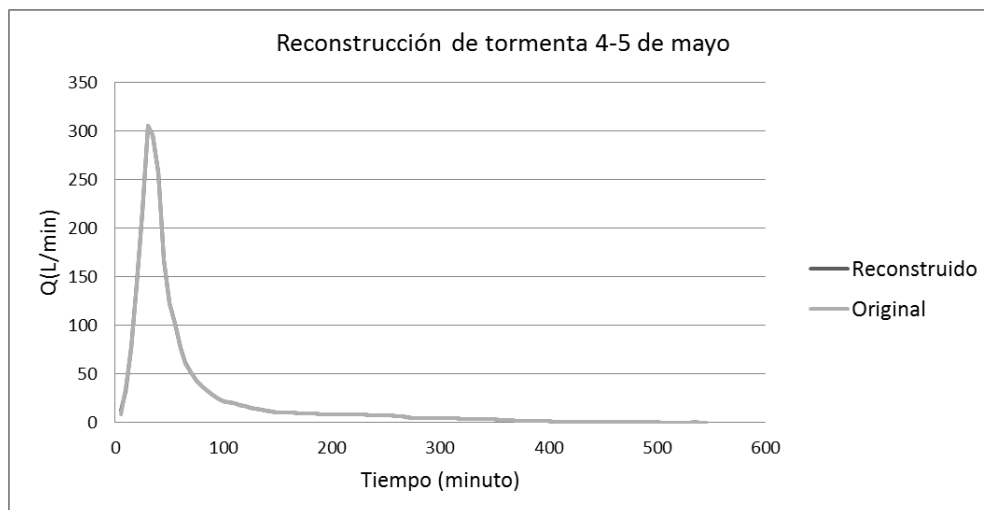
**Fuente:** autores

### HU matricial depurado

Luego de descartar un pulso de lluvia que hacía parte de una tormenta diferente por presentarse una hora después de los pulsos iniciales, se obtuvo el HU depurado y se reconstruyó la tormenta del 4-5 de mayo tal como se aprecia en la Figura 4 en la que se evidencia un perfec-

to ajuste entre la línea de color gris claro que corresponde a la tormenta real y la línea continua de color gris oscura que representa la tormenta reconstruida. El REMC obtenido fue de 0,42 L/min, siendo el error más bajo de los HU calculados por los tres métodos.

**Figura 4:** reconstrucción de tormenta del 4-5 de mayo a partir de HU matricial final



**Fuente:** autores

## CONCLUSIONES

- Se adopta el HU matricial depurado para la Unidad Hidrológica de la Quebrada Padre de Jesús, calculado con base en la tormenta presentada los días 4-5 de mayo de 2017, el cual presentó un REMC de 0,42 L/min. Representando el comportamiento hidrológico real de la cuenca.
- Existe una relación directa entre la saturación de la cuenca en el proceso de obtención del HU, concluyendo que sus resultados de predicción son mejores cuando la cuenca se encuentra saturada.
- Con el presente estudio de caso se determinó la baja aplicabilidad de los métodos sintéticos en el cálculo de los HU para la Quebrada Padre de Jesús.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aparicio, F. J. (2015). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: LIMUSA S.A.

Barrios, M. I., & Olaya, J. E. (2007). Cálculo y análisis de hidrogramas para el flujo torrencial del 22 de Junio de 2006 ocurrido

en la microcuenca "El Salto", Ibagué-Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 10.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw Hill.

Diez, J. M. (2012). *Módulo 4 generación de hidrogramas*. Valladolid.

Escuela de geo ciencias y medio Ambiente. (2005). Implementación del modelo MG para Antioquia y el Eje Cafetero. *Avances en Recursos Hidráulicos*.

Google Earth. (30 de Junio de 2017). Google Earth. Bogotá DC.

Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de Drenaje Para Carreteras*. Bogotá D.C.

Jena, S., & Tiwari, K. (2006). Modeling Synthetic Hydrograph Parameters with Eomorphologic parameters of watersheds. *Journal of hydrology*, 1-14.

López, J., Gimena, F. G., & Aguirre, U. (2005). Analysis of a unit hydrograph model based on watershed

- geomorphology represented as a cascade of reservoirs. *Agricultural Water* , 128-143.
- Patiño, O., & Osorio, I. (2011). ESTUDIO FÍSICO-QUÍMICO DE LA QUEBRADA PADRE DE JESÚS, DESDE LA VEREDA FÁTIMA HASTA SU CANALIZACIÓN EN LA AVENIDA CIRCUNVALAR DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ . *Geomática UD.GEO* , 103-114.
- Rodriguez, J. P. (2013). *DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (SEDIMENTADOR SEDHELCON Y REACTOR BIOLÓGICO AERÓBICO MODIFICADO FLOCAIRRF) EN PLANTA PILOTO*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Santos, A. C. (2008). Modelación Hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HECRAS. *Avances en recursos hidráulicos* .
- Usul, N., & Kupcu, O. (1997). *Obtaining SCS Synthetic unit hydrograph by GIS techniques*. Obtenido de ESRI: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to600/pap594/p594.htm>.
- Valero, J. (2017). Programa de interpolación de datos (Excel). Bogotá, Colombia.