

Ubicación automática de posiciones críticas de tormentas patrones para análisis de riesgo hídrico en piedemonte del Área Metropolitana de Mendoza (Argentina)

Nadine Gärtner¹, Victor Hugo Burgos^{1,2}

¹ Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino, Mendoza

² Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza

E-mail: gaertner.nadine@googlemail.com, vburgos@ina.gob.ar

RESUMEN:

En el piedemonte ubicado al oeste de Mendoza, diversas causas antrópicas modifican el uso del suelo, entre las cuales, la presión inmobiliaria y el avance de la frontera agrícola impactan significativamente en la respuesta hidrológica de cuencas aluvionales, produciendo efectos severos manifestados en inundaciones urbanas, erosiones y daños materiales.

La modelación hidrológica pseudo distribuida tiene limitaciones en la distribución espacial de las tormentas y en la ubicación del núcleo de tormenta a modelar. El uso de Sistemas de Información Geográfica es ideal para calcular y analizar espacialmente el problema, determinando parámetros de ingreso al modelo de transformación lluvia-caudal. Para encontrar la posición crítica del evento a simular, se necesita una gran cantidad de iteraciones, sólo factible mediante procesos automatizados.

El presente trabajo trata sobre geoprocesos automatizados, como herramienta de mapeo y análisis espacial, para encontrar el punto crítico y evaluar la incidencia hidrológica de la ubicación de tormentas sintéticas.

Para el caso de estudio se analizó una cuenca de 176 km², correspondiente a la Quebrada de las Avispas al sur del río Mendoza.

Las herramientas desarrolladas fueron algoritmos en lenguaje Python, que permitieron estimar la posición crítica de una tormenta patrón (de tipo sintética y con un decaimiento espacial determinado estadísticamente) y calcular luego, mediante modelación hidrológica la respuesta ante ese evento de precipitación simulado.

Los resultados indican que un error de posicionamiento del núcleo de tormenta puede generar subestimaciones de caudal de hasta un 60%. Además se puede analizar la distancia más desfavorable de una tormenta respecto de su salida, siendo muy útil para sistemas de alerta con radar.

Consideramos que estudios de este tipo, pueden significar para las autoridades locales, un insumo veraz y oportuno de apoyo para diseñar y establecer estrategias de planes y acciones de atención, mitigación o prevención a la población ante riesgos de inundación.

PALABRAS CLAVE: isohieta patrón, núcleo de tormenta, riesgos.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Desde hace mucho tiempo la lluvia como dato de entrada en simulaciones hidrológicas ha sido un punto clave y también, por lo general, un punto desatendido. La suposición de que la lluvia cae de manera uniforme sobre una cuenca de cualquier tamaño es para un lugar como Mendoza –en donde dominan las lluvias convectivas– poco probable. El Piedemonte está ubicado en la provincia de Mendoza, al oeste de la ciudad de Mendoza, a los pies de los Andes. La ciudad de Mendoza está ubicada en una zona árida y con pocas precipitaciones (200 mm/año) [Fernández, et al., 1999]. En contraposición, se registran más precipitaciones en el Piedemonte (desde 220 mm/año hasta 400 mm/año) [Fernández, et al., 1999]. La mayoría de las lluvias caen durante los meses de verano, desde diciembre hasta marzo [Fernández, et al., 1999], en forma de lluvias torrenciales y causan el mayor daño en lo que se refiere a inundaciones y aludes. En los meses de invierno, desde junio hasta agosto, las precipitaciones se deben a frentes superficiales y son, por lo tanto, uniformes. Cabe destacar que estas lluvias no son la principal causa de daños, sino que las lluvias cuasi estacionarias convectivas lo son [Chappell, 1986].

La dificultad para predecir la ocurrencia y la posición de las tormentas con núcleo sobre una cuenca conduce al modelador a un gran dilema: ignorar las condiciones climáticas reales y simular la hidrología utilizando datos de precipitación altamente simplificados o calcular incontables láminas de precipitación de entrada y ejecutar una excesiva cantidad de simulaciones hidrológicas para después obtener el resultado del peor escenario posible.

En este trabajo se ha intentado afrontar este dilema mediante una tormenta patrón típica de esta área y la elaboración de una herramienta SIG programada en Python, la cual desplaza a esta tormenta patrón de forma automática sobre muchas secciones de la cuenca y encuentra a las posiciones más críticas, es decir, en dónde cae la mayor cantidad de lluvia sobre la cuenca, generando finalmente los archivos de entrada de lluvia para el software ArHymo. Sabiendo que hay varios tipos de tormentas con núcleo (unicelular, multicelular, supercelular [Doswell, et al., 1996]), se hace uso de una sola tormenta, la cual no se mueve durante el evento, ya que se presupone que una tormenta cuasi-estacionaria con núcleo es la conjunción de varias tormentas y por esta razón, es la causante del mayor daño.

Además del desarrollo de la herramienta, otro objetivo de este trabajo fue efectuar una comparación entre el método ya mencionado y el método simplificado de precipitación uniforme sobre la cuenca, para concluir, por un lado, si hacer el paso del pre procesamiento es realmente necesario y, por otro lado, para observar cuales son las diferencias obtenidas en los resultados de las distintas modelaciones hidrológicas.

Para el caso de estudio se analizó una cuenca de 176 km², correspondiente a la Quebrada de las Avispas.

1.2 *Objetivo*

El objetivo del estudio fue mejorar la metodología existente para la carga de hietogramas en el modelo hidrológico ARHymo.

Como objetivos específicos se tuvieron:

- a) Confeccionar isohietas patrones para caracterizar las tormentas convectivas de la región,
- b) Estimar la posición crítica del núcleo de tormenta sobre la cuenca que maximice la lámina de precipitación media areal,
- c) Automatizar los procesos de carga de datos al modelo hidrológico y de cálculos iterativos dentro del SIG,
- d) Evaluar la influencia de la posición de la tormenta respecto de los caudales de salida, en una cuenca piloto.
- e) Comparar la metodología desarrollada con técnicas tradicionales.

1.3 *Estado del arte*

Para el diseño de obras hidráulicas y predicción de riesgos, el método de vanguardia consiste en utilizar las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), en el análisis, la ingeniería es altamente dependiente de las precipitaciones como valor de entrada. El método de las curvas IDF es muy bueno cuando se aplica en zonas bien vigiladas y con registro de datos históricos validados, pero siempre trae problemas cuando intenta aplicarse en zonas con ausencia de datos tomados a largo plazo [Mohymont, et al., 2004] o cuando es difícil acceder a los puestos de medición (por cuestiones de terreno o costos, por ejemplo). En este método, se utiliza la hipótesis de que el decaimiento es estacionario y no tiene en cuenta el cambio climático a lo largo del tiempo [Mailhot, et al., 2007]. También influye si las precipitaciones son de origen convectivo o estratiforme.

Mendoza es un ejemplo de zona problemática para aplicar el método. Los datos históricos son escasos, al igual que la cantidad de puntos de medición que forman la red. Además, la cercanía a la montaña influye mucho, ya que a pesar de que la mayor parte de las zonas urbanas se encuentran en la llanura, en el cercano piedemonte las precipitaciones pueden llegar a duplicarse a lo largo de unos pocos kilómetros, lo cual complica el diseño y convierte al método de las curvas IDF en un tanteo en la oscuridad.

[Burgos, et al., 2015] enfrentaron este problema haciendo uso de tormentas patrón sobre una cuenca. Este trabajo continúa con esa idea y profundiza añadiendo una herramienta automática.

2 EL PROCESO (MATERIALES Y MÉTODOS)

2.1 *Esquema del proceso entero*

La Figura 1 muestra todo el procedimiento. En primer lugar se realizó un estudio del área utilizando los datos satelitales del Modelo Digital de Elevaciones (DEM). Con esta información es posible obtener tanto la

pendiente de la cuenca, como también la dirección del flujo. Ambas conducen a la creación de la red sintética de drenaje y luego a la determinación de las subcuencas. Con el DEM y los mapas de uso del suelo se obtiene el Número de Curva (CN) para cada subcuenca. Todos estos pasos forman la base del modelo hidrológico en ArHymo. Resta solamente incluir los datos de las precipitaciones para cada subcuenca. Se tomó la tormenta patrón -calculada especialmente para la zona pedemontana- de un trabajo anterior y se siguió la metodología propuesta por [Burgos, et al., 2015].

La cuenca con sus propiedades se mantendrá constante mientras se hace correr cada una de las entradas de precipitación y los hidrogramas resultantes serán comparados. Se compararán entonces los resultados de descarga máxima de los tres puntos críticos en cada zona (alta, intermedia y baja) entre ellos y también el resultado del frente superficial con estos puntos críticos. Esta comparación es importante para hallar la descarga máxima de los 4 resultados en cada recurrencia, para luego utilizar este dato en diseños, estudios de riesgo, etc.

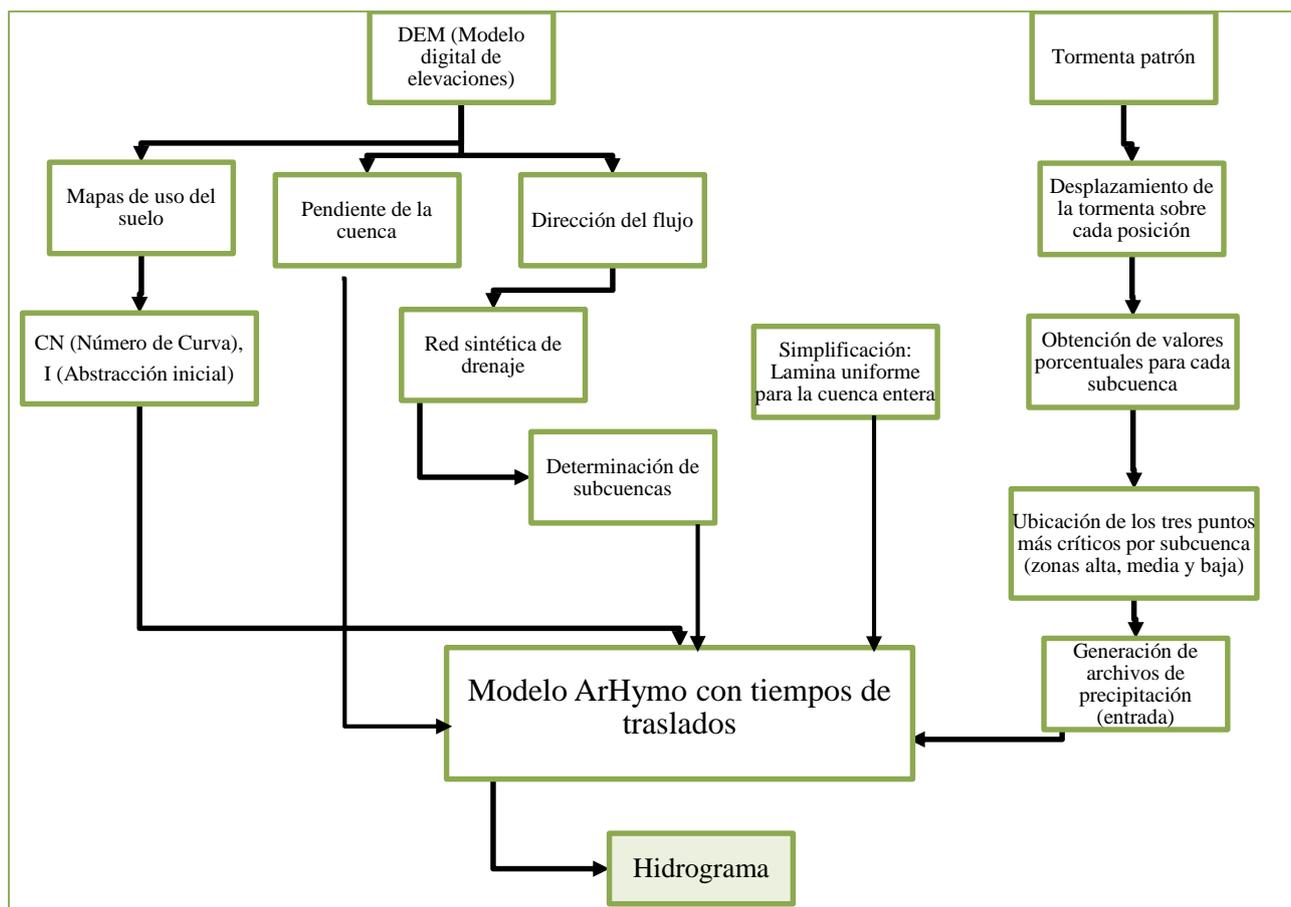


Figura 1.- Esquema del procedimiento paso a paso hasta la obtención de los hidrogramas para su futura comparación

2.2 Área de Estudio

El área de estudio está ubicada en Argentina, en la provincia de Mendoza, al oeste de la ciudad de Mendoza (ver Figura 2). La Quebrada de las Avispas está ubicada al sur del río Mendoza, y descarga torrencialmente en un cauce seco que en su tramo final está canalizado, como colector escudo para la zona industrial donde se ubica la destilería de Luján de Cuyo.

El piedemonte estudiado comprende a la zona ubicada entre la precordillera y la llanura que abarca partes del área metropolitana de los departamentos de Mendoza, Las Heras, Godoy Cruz y Luján de Cuyo. Su relieve desciende desde la precordillera a 3455 msnm hasta los 730 msnm en la llanura. Está ubicado a más de 1000 km del océano Atlántico y a 170 km del océano Pacífico. El anticiclón del Atlántico trae masas de aire cálido y húmedo del noreste y produce todas las precipitaciones de la región de las llanuras [Ortíz Maldonado, 2001]. Por su ubicación, condiciones geológicas y meteorológicas su tipo de suelo varía entre entisoles (torriortentes y torrifluventes) y ardisoles paleortides ubicados en terrazas aluvionales. Para el uso de suelo se utilizó un índice NDXI (Burgos et al, 2018) con clases antrópicas impermeabilizadas, naturales distinguiendo cobertura vegetal (de regular a muy buena), y agua.

La cuenca La Quebrada de las Avispas es una zona rural con pocos asentamientos humanos y es atravesada por la Ruta Nacional N° 7.

Toda la cuenca descarga en un punto en el extremo este de la subcuenca 0908 en el río Mendoza, teniendo el último tramo (antes de descargar) un colector de gran capacidad.

La cuenca no tiene diques, por lo que al no haber construcciones antropogénicas que interfieran en la respuesta hidrológica, la convierte en un caso de estudio perfecto.

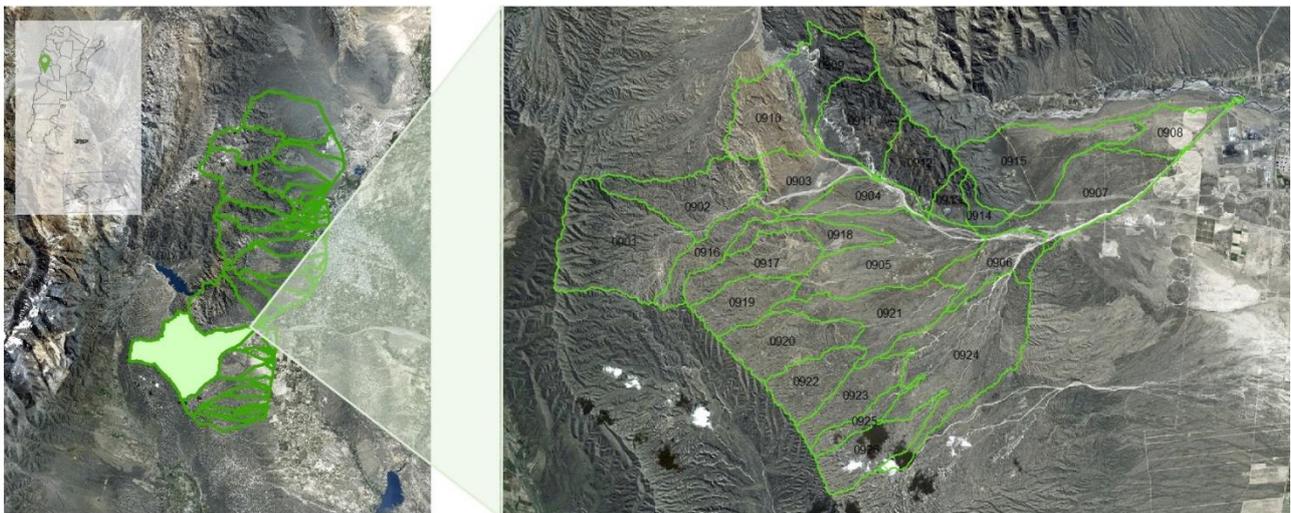


Figura 2.- Ubicación de la cuenca "La Quebrada de las Avispas" con referencia al territorio argentino y a la zona del piedemonte del Gran Mendoza

Tabla 1.- Parámetros morfométricos de subcuencas en área de estudio

Subcuenca		Cauce					Cuenca				
		Hmin [m]	Hmax [m]	dH [m]	Lfp [km]	Pend. media [%]	Pend. media [%]	Area [km ²]	CN [-]	S [mm]	Ia [mm]
0901	R09A	2462,6	1817,5	645,2	7,00	13,7	35,8	14,66	86,1	41,1	7,71
0902	R09B	2297,1	1658,5	638,5	7,40	12,1	27,2	8,74	86,5	39,5	7,55
0903	R09C	1712,7	1449,8	262,8	5,90	5,3	13,4	5,93	85,3	43,6	7,98
0904	R09D	1644,8	1383,6	261,2	6,36	4,7	10,1	4,39	83,6	49,7	8,57
0905	R09E	1664,3	1315,2	349,1	8,63	4,9	7,2	12,67	85,9	41,8	7,79
0906	R09F	1389,8	1250,4	139,4	5,24	3,8	10,1	5,15	86,9	38,3	7,42
0907	R09G	1353,3	1137,8	215,6	10,34	3,0	4,6	10,21	82,2	55,1	9,07
0908	R09H	1184,7	1090,7	94,1	7,38	2,5	2,2	4,29	75,3	83,4	11,39
0909	R09I	2319,9	1625,6	694,3	4,50	23,0	37,5	6,37	83,4	50,7	8,66
0910	R09J	1912,1	1516,4	395,6	7,08	10,5	23,5	7,48	84,8	45,6	8,17
0911	R09K	2248,0	1523,8	724,2	4,60	22,9	43,4	7,75	82,7	53,1	8,88
0912	R09L	2142,9	1449,4	693,5	2,95	35,4	52,6	5,19	82,2	55,1	9,07
0913	R09M	1870,3	1377,2	493,1	2,65	25,2	38,7	1,76	82,1	55,5	9,10
0914	R09N	1861,3	1301,1	560,2	3,01	22,8	29,1	1,36	82,3	54,7	9,03
0915	R09O	1723,5	1160,8	562,7	9,47	7,3	19,1	11,64	82,5	54,0	8,97
0916	R09P	2094,8	1636,7	458,1	7,06	9,1	22,3	4,17	86,6	39,4	7,54
0917	R09Q	2070,7	1547,4	523,3	6,47	9,9	19,2	6,13	86,8	38,6	7,46
0918	R09R	1817,3	1436,3	381,0	7,92	5,9	11,1	3,62	86,5	39,5	7,55
0919	R09S	2085,9	1613,5	472,3	4,97	11,5	23,9	4,70	86,5	39,6	7,57
0920	R09T	2040,6	1492,0	548,6	6,29	10,8	22,4	7,23	86,5	39,6	7,56
0921	R09U	1722,8	1349,2	373,7	8,88	5,1	7,8	8,46	87,5	36,3	7,21
0922	R09V	1937,9	1504,7	433,2	4,61	12,1	23,4	4,99	86,8	38,7	7,47
0923	R09W	1884,5	1425,3	459,2	6,01	10,7	18,7	4,94	87,3	36,9	7,28
0924	R09X	1630,8	1295,6	335,2	10,51	4,0	10,1	16,54	87,4	36,6	7,25
0925	R09Y	1893,4	1455,2	438,2	5,87	10,1	21,3	2,29	87,4	36,5	7,23
0926	R09Z	1928,9	1451,4	477,5	6,72	9,8	21,9	5,71	87,4	36,7	7,25
TOTAL							176,37				

Las subcuencas están denominadas en la forma “09XX”, donde el 09 corresponde al número de la cuenca y donde XX pueden tomar los valores de 01 a 26, juntos forman el nombre de la subcuenca. En Tablas 1 y 3 se presentan sus características morfométricas más importantes. En el modelo hidrológico Arhymo no es posible llamar a las subcuencas de esta manera, ya que aunque existe una limitación de cuatro dígitos para los nombres, es obligatorio empezar con una “R” (por cuenca rural). Por lo tanto se optó por mantener el “09” del nombre de la cuenca y utilizar las letras del abecedario (de la A a la Z) en correspondencia con los números del 01 al 26.

2.3 Obtención de las tormentas patrón

Como ya se mencionó, el método de las curvas IDF es de vanguardia, pero utilizar tormentas de diseño ofrece un enfoque más realista.

Para esto, se utiliza la ecuación 1, la cual sirve para reducir la precipitación puntual a valores promedios en el área. Las ecuaciones y las curvas IDF provienen de estudios técnicos del INA-CRA.

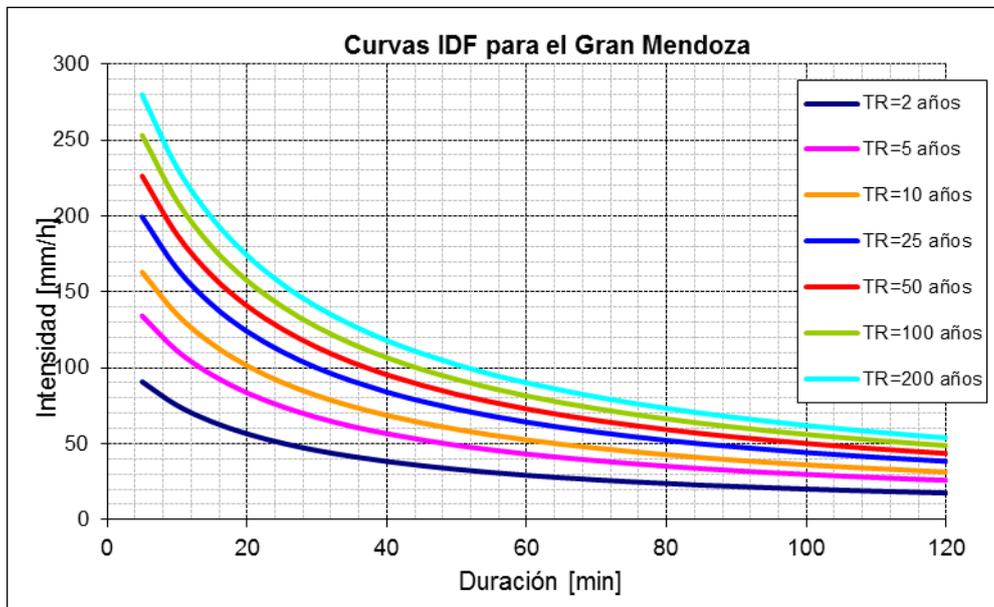


Figura 3.- Curvas IDF para el área del Gran Mendoza con tiempos de recurrencia de 2 a 200 años

La relación Lámina-Área ajustada es:

$$\% \text{ Lluvia puntual} = 1 - 0,7632 * (1 - e^{-0,00769 * \text{Area}}) \quad (1)$$

A partir de esta ecuación se diseña una tormenta elíptica, donde cada elipse corresponde a una curva IDF. Un área de 8,8km² corresponde a un decaimiento espacial del 95%. Siendo el área de una elipse:

$$A_{\text{Elipse}} = a * b * \pi \quad (2)$$

y la relación de la elipse a:b = 1,5:1 [Burgos, et al., 2015], calculando todas las otras elipses, se establece la siguiente isohieta patrón:

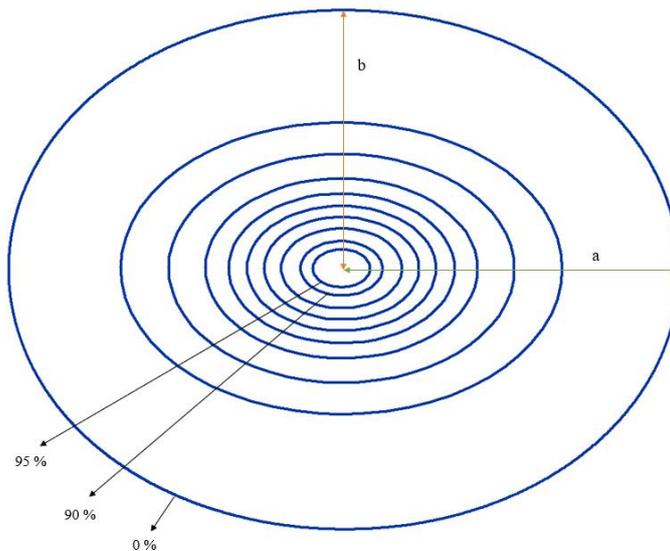


Figura 4.- Isohietas elípticas patrones para la zona del Piedemonte y su decaimiento espacial

2.4 Principios de procesamiento de la herramienta SIG

La herramienta desarrollada es un script en lenguaje Python, la cual sirve para encontrar las posiciones críticas de una tormenta patrón sobre una cuenca cualquiera. Los programas SIG permiten automatizar procesos mediante Python y es la solución por antonomasia cuando se requiere de una gran cantidad de repeticiones. Primero se decidió poner una grilla rectangular de 500 m de resolución sobre toda la cuenca. La herramienta automáticamente encuentra los puntos mínimos y máximos de ambos ejes de coordenadas. Esta grilla es la referencia para los centros de los núcleos de la tormenta, los cuales se desplazan en cada repetición. Los 500 m fueron elegidos porque presentan la mejor relación de compromiso entre cantidad de simulaciones y resolución aceptables.

Luego se posicionó el núcleo de la tormenta en cada uno de los 1924 nodos y se determinó la lámina de precipitación media areal para cada una de las 26 subcuencas. Antes de poder determinar la precipitación media se tiene que convertir la tormenta patrón desde su formato *shape* a TIN y luego desde TIN a *raster*. Una vez convertido a *raster*, se puede rotar la tormenta para que tenga el mismo ángulo que la cuenca y tenga la mayor cobertura posible. A partir de allí se mueve la tormenta directamente a cada nodo, calculando nodo a nodo el decaimiento areal por subcuenca y la media ponderada por superficie total.

Los datos de cada precipitación sintética se guardan en un archivo .txt y el dato del decaimiento espacial ponderado nodal se guarda en una matriz.

Después de haber generado precipitaciones para cada nodo, la herramienta busca los valores más altos del decaimiento espacial ponderado, es decir, la mayor cantidad de lluvia que cae en cada zona. Se determinan tres zonas: alta, media y baja y la herramienta genera un hietograma (archivos .dat de precipitación de entrada para el modelo hidrológico) para cada subcuenca y para cada posición crítica y recurrencia analizada.

$$n_{\text{Hietogramas}} = \text{posiciones}_{\text{críticas}} * \text{subcuencas} * \text{recurrencias} \quad (3)$$

Con tres posiciones críticas, 26 subcuencas y siete recurrencias (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años) se generan 564 hietogramas en total (ver ecuación 3), que luego serán usadas para el modelo ArHymo.

2.5 Métodos para confirmar los resultados

Ante la falta de datos para calibrar y validar los resultados, se usan varios métodos para corroborarlos. Uno de estos métodos es el cálculo del tiempo de concentración. Con un sencillo script desarrollado en MATLAB se calculó el tiempo de concentración con varios métodos (ver Tabla 2). Debido al hecho de que muchos de estos métodos están limitados a áreas pequeñas, se eliminaron los valores atípicos y se calculó la media ponderada de todos los valores de las subcuencas. En Tabla 2 se indican los métodos utilizados y en Tabla 4 se presentan los resultados.

Tabla 2.- Métodos, sus respectivas expresiones y dimensiones para el cálculo de tiempo de concentración

Métodos	Expresión	Dimensiones	Fuente
<i>Kirpich</i>	$t_c = \left(0,868 * \frac{L^3}{\Delta H}\right)^{0,385}$	L= [km], ΔH = [m]	[Bodhinayake, 2004]
<i>Kerby</i>	$t_c = 3,03 * n^{0,47} * L^{0,47} * S_c^{-0,23}$	n=[-], L= [km], S _c =[m/km]	[Bodhinayake, 2004]
<i>Ragan and Dune</i>	$t_c = 57,8 * n^{0,6} * I_R^{-0,4} * L^{0,6} * S_c^{-0,2}$	n=[-], I _R =[mm/h], L= [km], S _c =[m/km]	[Bodhinayake, 2004]
<i>Bransby and Williams</i>	$t_c = 0,97 * L * A^{-0,1} * S_c^{-0,2}$	L= [km], A=[km ²], S _c =[m/km]	[Bodhinayake, 2004]
<i>Bruce and Clark</i>	$t_c = 3,05 * n^{0,47} * L^{0,47} * S_c^{-0,23}$	n=[-], L= [km], S _c =[m/km]	[Bodhinayake, 2004]
<i>Pilgrim and McDermott</i>	$t_c = 0,76 * A^{0,38}$	A=[km ²]	[Bodhinayake, 2004]
<i>Black et al.</i>	$t_c = 1,02 * A^{-0,113} * S_c^{-0,215} * L^{1,015}$	A=[km ²], S _c =[m/km], L= [km]	[Burgos, et al., 2016]
<i>Wong</i>	$t_c = 57,8 * n^{0,6} * I_R^{-0,4} * L^{0,6} * S_c^{-0,2}$	n=[-], I _R =[mm/h], L= [km], S _c =[m/km]	[Bodhinayake, 2004]
<i>Pezzoli</i>	$t_c = 0,055 * L * S_c^{-0,5}$	L= [km], S _c =[m/m]	[Burgos, et al., 2016]
<i>DNOS</i>	$t_c = 0,419 * (K^{-1} * A^{0,3} * L^{0,2} * S_c^{-0,4})$	K=4,5 [-], A=[km ²], L= [km], S _c =[m/m]	[Burgos, et al., 2016]

Tabla 3.- Valores de entrada para ArHymo para simular con una sola cuenca

	Area [km ²]	CN [-]	I _A [mm]	ΔElevación [m]	L _{fp} [km]
<i>Cuenca 009</i>	176,367	85,195	8,018	1372	33,064

2.6 ArHymo

ArHymo es un modelo matemático de simulación de un sistema hidrológico que funciona con la transformación lluvia-caudal, clasificado como un modelo determinístico de parámetros concentrados y de eventos aislados o discreto. Sus siglas Ar significan Argentina e indican un modelo regional y el modelo HYMO, creado en 1973, es apócope de HYdrological MOdel [Maza, et al., 1996]. El modelo es programado en lenguaje Fortran pero la versión actual (3.2), tiene una interfaz de usuario gráfica (GUI) y es de fácil manejo. Los valores de entrada para cada subcuenca y que definen al modelo son el área, el CN, la abstracción inicial (Ia), la longitud del cauce más largo y la diferencia en la elevación. A cada subcuenca se le asigna un hietograma. En cada subcuenca se calcula el hidrograma y se traslada este caudal mediante tramos y por nodos hasta la próxima subcuenca o hasta el próximo nodo (ver Figura 5). En el nodo se calcula el hidrograma. A los tramos se les puede asignar un tiempo de traslado que sirve para calibrar el modelo. Este tiempo de traslado se calcula con la velocidad de escurrimiento (de 1 m/s a 5 m/s) y la longitud del tramo.

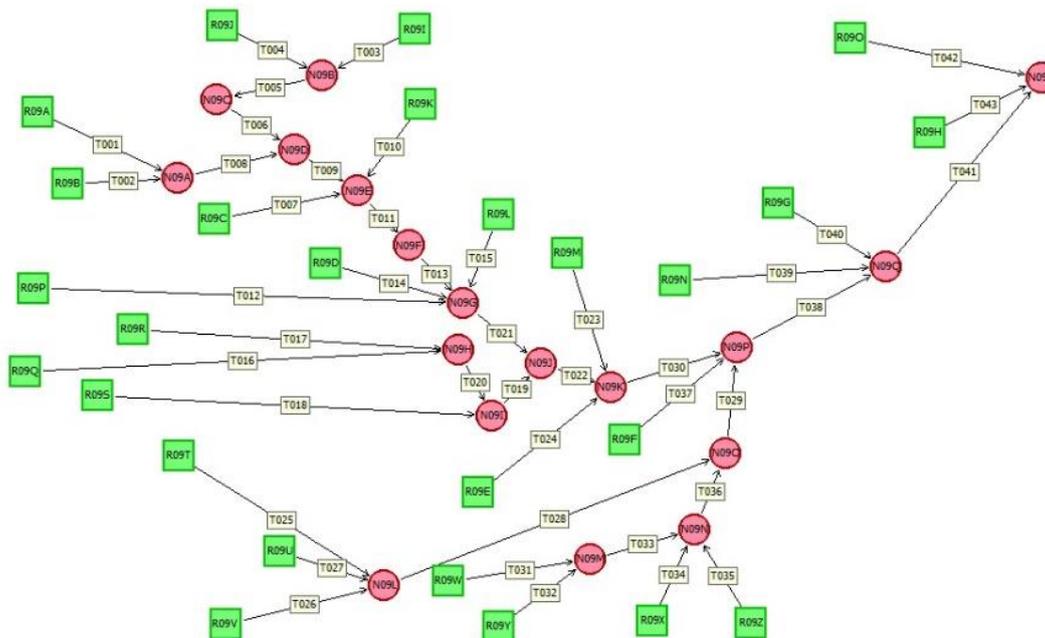


Figura 5.- Esquema topológico de la cuenca "La Quebrada de las Avispas" como modelo armado en ArHymo 3.2

3 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL PROCESO SOBRE LA CUENCA "LA QUEBRADA DE LAS AVISPAS"

3.1 Resultados de los desplazamientos de la tormenta con núcleo

En la Figura 6 se observa la precipitación media areal con las coordenadas geográficas correspondientes a la cuenca. La gráfica se divide en las 3 zonas previamente mencionadas (alta, intermedia y baja). En cada zona puede identificarse una estrella, que corresponde al punto crítico, es decir, donde se da la precipitación máxima. Estos 3 puntos son de suma importancia, ya que son los únicos valores que usará ArHymo.

La Figura 6 ilustra la enorme influencia que tiene la posición de la tormenta en la cantidad de lluvia que cae sobre la cuenca.

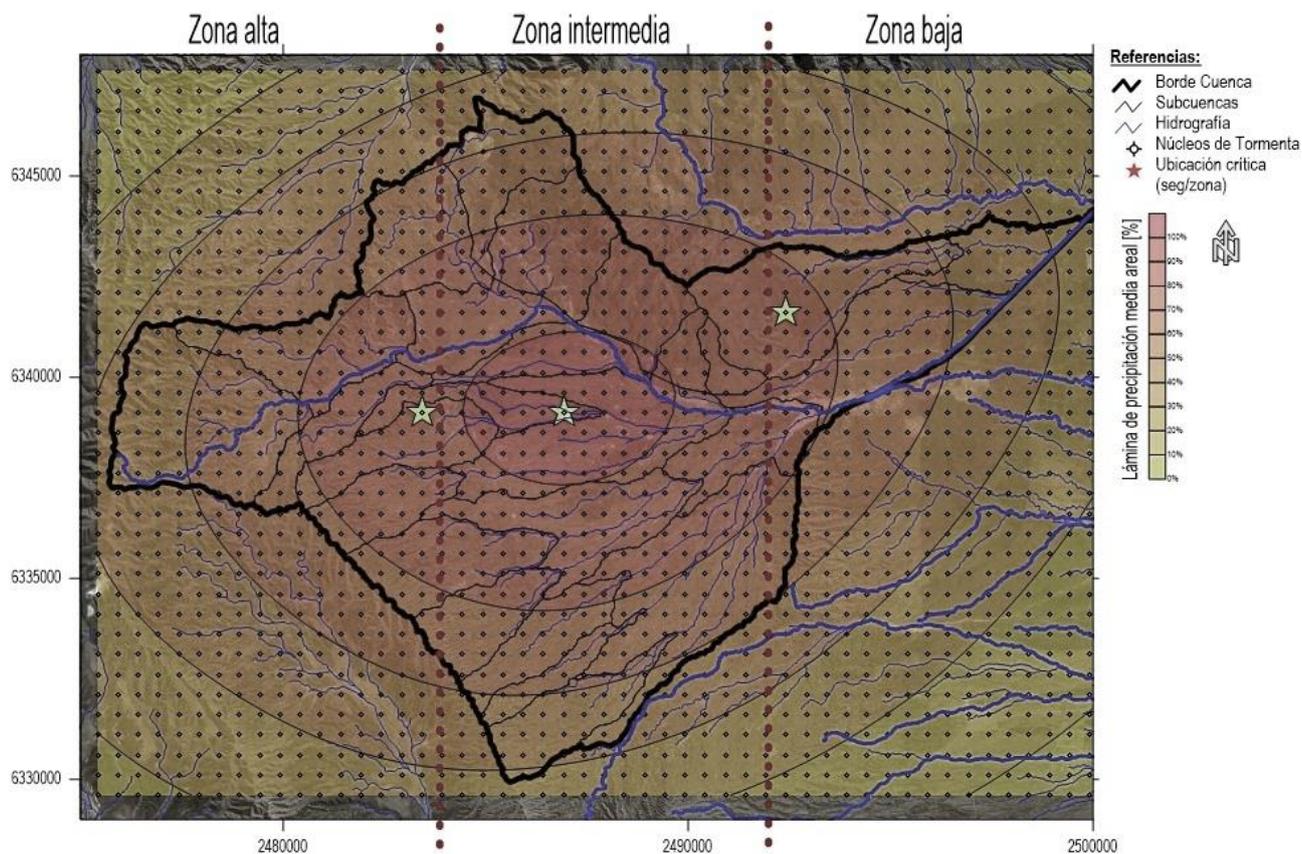


Figura 6.- Distribución de la lámina de precipitación media areal según la ubicación del Núcleo de Tormenta en la cuenca "La Quebrada de las Avispas". En cada nodo se ubicó el núcleo de tormenta y se calculó la lámina media areal por subcuenca.

3.2 Comparación entre las respuestas hidrológicas de la tormenta con núcleo y una sola cuenca

La Figura 7 y Tabla 5 siguientes, ilustran el caudal normalizado en función del tiempo para las tres zonas o posiciones críticas del núcleo de tormenta y la cuenca analizada de forma tradicional (método simplificado), donde zona alta = posición 1, zona intermedia = posición 2 y zona baja = posición 3.

En la Figura 7 se observa que el caudal máximo (el pico de cada curva) es distinto para todas ellas. Es notable la diferencia que tienen los valores máximos de las tres posiciones con el valor máximo del método tradicional (utilizando una cuenca sola y sin utilizar isohieta patrón), siendo este último mucho más pequeño y además su curva es más plana.

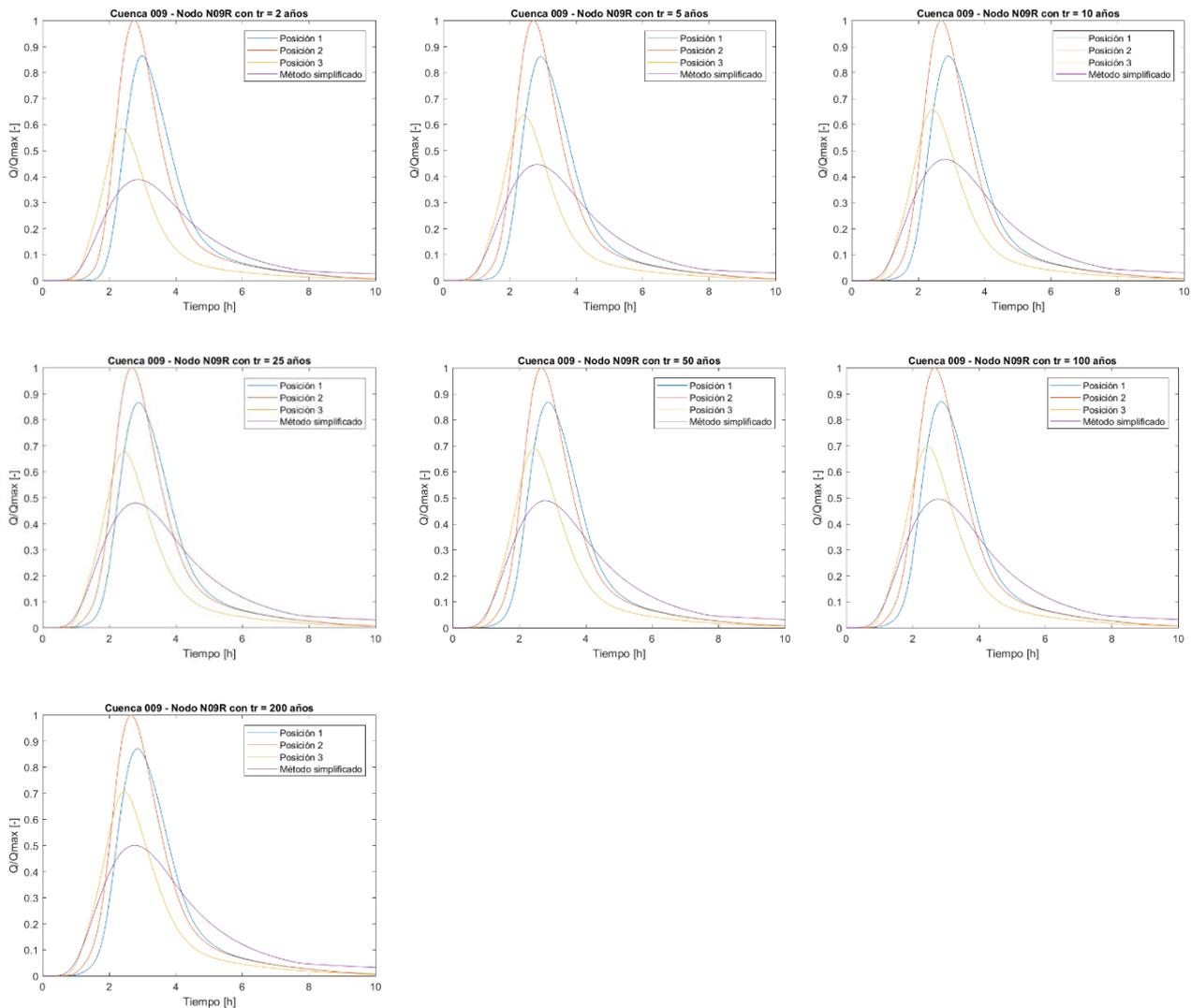


Figura 7.- Respuestas de la modelación hidrológica por cada condición en función del tiempo para cada recurrencia investigada

La posición 2 presenta siempre el mayor caudal máximo de entre todas las curvas, ya que debido a la forma de la cuenca, abarca el mayor área de la misma, por lo tanto posee la mayor entrada de lluvia.

A pesar de presentar el menor caudal máximo, analizar la posición 3 es de vital importancia, ya que este valor pico es el que sucede primero (presenta el menor tiempo pico), característica de gran interés por ser la posición más cercana a las zonas urbanas.

Con respecto a la posición 1, se observan tiempos pico mayores, pero también caudales máximos no muy por debajo de los de la posición 2, situación importante considerando que es la posición más alejada del punto de descarga.

De todo esto, se observa que la subestimación de la descarga máxima con el método convencional, alcanza valores de hasta el 50%, este hecho conducirá a que un sistema de desagüe colapse mucho más frecuentemente que lo planificado.

Tabla 4.- Resultados del cálculo del tiempo de concentración

<i>Método</i>	Resultado [h]	<i>Método</i>	Resultado [h]
<i>Kirpich</i>	3,34	<i>Pilgrim and McDermott</i>	5,43
<i>Kerby</i>	1,24	<i>Black et al.</i>	7,96
<i>Ragan and Dune</i>	3,91	<i>Wong</i>	3,95
<i>Bransby and Williams</i>	8,19	<i>Pezzoli</i>	6,91
<i>Bruce and Clark</i>	1,24	DNOS	2,57

Tabla 5.- Descargas máximas normalizadas a la máxima descarga [Q2] a la salida de la cuenca en ArHymo y comparación estadística de los resultados

	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 200
<i>Posición 1 [Q/Q_{max}]</i>	0,863	0,861	0,863	0,866	0,867	0,870	0,871
<i>Posición 2 [Q/Q_{max}]</i>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<i>Posición 3 [Q/Q_{max}]</i>	0,585	0,636	0,657	0,677	0,688	0,698	0,706
<i>Simplificado [Q/Q_{max}]</i>	0,387	0,446	0,466	0,479	0,488	0,494	0,500
<i>Desviación estándar</i>	0,275	0,245	0,234	0,227	0,222	0,219	0,216
<i>Promedio de las posiciones 1-3</i>	0,816	0,832	0,840	0,848	0,852	0,856	0,859

4 CONCLUSIONES

Del análisis se desprende la conclusión más importante: al comparar el sistema simplificado con la tormenta con núcleo, se observa que la descarga máxima obtenida utilizando el método convencional está totalmente subestimada. Se interpreta que esta marcada diferencia proviene de la suma de dos efectos: el de agregación (o factor de escala al pasar de 26 subcuencas a una) y el de distribución de la lámina de precipitación (pasando de un análisis de ubicación de posiciones críticas del núcleo de una isohieta patrón a la simplificación de obtener el hietograma desde una curva IDF con su ecuación de decaimiento espacial).

Lamentablemente, en toda la zona pedemontana no hay ningún registro de caudales. Esto sería de extrema utilidad para verificar los caudales de salida. Por ahora solo es posible interpretar los resultados en ArHymo. El próximo paso a dar será verificar la funcionalidad de la herramienta, simulando cuencas bajo condiciones climáticas convectivas de las cuales si existen registros de precipitaciones de entrada y de caudales de salida. Si se pudiese confirmar la funcionalidad de la herramienta y demostrar su confiabilidad, será un muy buen método para aplicar en zonas afectadas por lluvias convectivas, volviendo menos necesario poseer los datos de verificación. Esto será muy positivo para el diseño hidráulico y un paso más hacia una simulación confiable con pocos datos de entrada.

También es muy interesante conocer cuáles son los puntos de ubicación críticos de una tormenta sobre una cuenca, para instalar una red de pluviómetros en esas zonas o para conocer los tiempos de llegada de las crecidas simuladas que utilice un sistema de alerta, disminuyendo finalmente la vulnerabilidad al riesgo hídrico de la zona.

5 REFERENCIAS

- Bodhinayake, N. 2004. Influence of hydrological, geomorphological and climatological characteristics of natural catchments on lag parameters. Sydney : University of Technology Sydney, Australia; School of Civil, Mining and Environmental Engineering, 2004.
- Burgos, V. y Salcedo, A. 2016. Avance en el conocimiento de la respuesta hidrológica y sedimentológica de la Cuenca del A° seco Casa de Piedra, Las Heras, Mendoza. Mendoza: IFRH, 2016.
- Burgos, V. y Salcedo, A. 2015. Técnicas geomáticas para análisis de tormentas de diseño en cuencas aluvionales de Catamarca. Córdoba: EHRAS, 2015.
- Burgos, V., Martínez, L y Salcedo A. 2018. Actualización del mapa de CN (número de curva) del Gran Mendoza. En IV Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos, IFRH. En prensa.
- Chappell, C.F. 1986. Quasi-Stationary Convective Events. [aut. libro] Peter S. Ray (eds). Mesoscale Meteorology and Forecasting. Boston : American Meteorological Society, 1986.
- Doswell, Ch. A. III, Brooks, H. E. und Maddox, R. A. 1996. Flash flood forecasting: an ingredients based methodology. Wea. Forecasting. 1996.
- Fernández, P., Fornero, L. y Rodríguez, S. 1999. Sistemas hidrometeorológicos en tiempo real - Lluvias, Tormentas y Alerta Hidrológica de Mendoza. Mendoza : Academia Nacional de Agronomía y Veterenaria, 1999. 987-9366-13-5.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., y Talbot, G. 2007. Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). Journal of Hydrology. Volume 347(1-2), 197-210.
- Maza, Jorge A., et al. 1996. Arhymo. Mendoza: Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas - Centro Regional Andino, 1996.
- Mohyont, B., Demarée, D. R. und Faka, D. N. 2004. Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa – comparison of techniques and results. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2004, Bd. 4, 684-9981/nhess/2004-4-375.
- Ortíz Maldonado, A. 2001. Distribución geográfica de los elementos meteorológicos principales y adversidades de Mendoza. Córdoba: Triunfar S.A., 2001. 987-9449-87-8.