

Avance en el conocimiento de la respuesta hidrológica y sedimentológica de la Cuenca del arroyo seco Casa de Piedra, Las Heras, Mendoza.

Victor H. Burgos¹ y Ana Paula Salcedo¹

¹Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino. Belgrano (O) 210. Mendoza

E-mail: vburgos@ina.gob.ar

RESUMEN

La ciudad de Mendoza y sus localidades aledañas, ubicadas en el sector distal del piedemonte precordillerano, se encuentra sometida a riesgo aluvional durante el verano. Importantes tormentas convectivas de altas intensidades y corta duración producen escorrentías en cauces secos, que amenazan a la población ubicada aguas abajo.

En los años 80', se puso en funcionamiento el primer sistema hidrometeorológico en tiempo real, compuesto por una red telemétrica de pluviómetros ubicados al oeste de la ciudad, para la recolección de datos y en pos de la conformación de un sistema de alerta. En este contexto, el presente trabajo contribuye en el análisis de los fenómenos aluvionales, tomando como caso de estudio, la cuenca del arroyo seco Casa de Piedra.

El área de estudio se ubica entre 32°44' y 32°52' de latitud S y 68°55' a 69°07' de longitud O. La cuenca posee un área de 97 Km², un desnivel de más de 2200 m con una cota máxima que llega a los 3450 msnm.

El objetivo del presente estudio es avanzar en el conocimiento del comportamiento hidro-sedimentológico de la cuenca, para obtener: a) caudales para distintas recurrencias de tormentas, b) tiempos de respuesta según la ubicación crítica del núcleo de tormenta, c) curvas isocronas para establecer alertas, y d) carga sólida de los hidrogramas simulados. Dentro de un entorno SIG, se procesan y comparan tres metodologías para la obtención de isocronas, dos métodos de estimación de producción de sedimentos y un análisis de la tormenta patrón respecto a su ubicación crítica y decaimiento espacial.

Los resultados obtenidos (no validados o calibrados por ausencia de aforos) se ponen a discusión, enfatizando la contribución al sistema de alerta hidrológico del Gran Mendoza. Conocer la amenaza hídrica posibilitará una adecuada Gestión Integral de Crecidas, minimizando las incertidumbres y analizando múltiples escenarios de potencial ocurrencia.

INTRODUCCIÓN

Ubicación área de estudio

La cuenca del arroyo (A°) Casa de Piedra se encuentra al noroeste de la ciudad de Mendoza, en el faldeo oriental de la Precordillera de los Andes (Figura 1). Climáticamente corresponde a un área semi-desértica, con gran amplitud térmica diaria, caracterizada por tener precipitaciones medias anuales inferiores a 200 mm, pero concentradas entre octubre y marzo con eventos convectivos con fuertes intensidades.

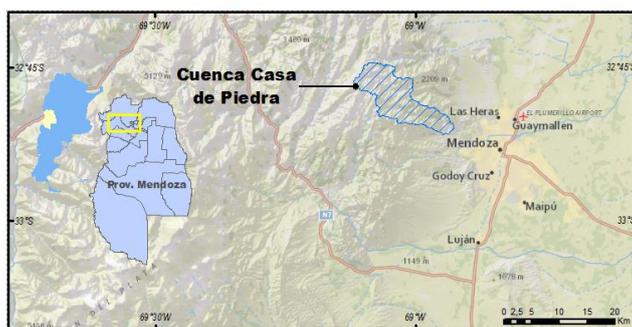


Figura 1.- Mapa ubicación área de estudio, cuenca arroyo Casa de Piedra.

Objetivo del estudio

El presente estudio tiene por objeto ampliar el conocimiento de las cuencas pedemontanas del Gran Mendoza, a fin de contribuir a la mejora del Sistema de Alerta Hidrológica, por medio de simulaciones hidrológicas y estimación de isocronas para establecer tiempos de respuesta ante emergencias. Para tal fin, se toma como estudio de caso una subcuenca del sector, denominada Casa de Piedra. Se avanza en dos frentes de análisis: a) el estudio del comportamiento hidrológico (precipitación, caudales, isocronas) y b) estimación de la producción y transporte de sedimentos.

Descripción de la problemática

El piedemonte se encuentra sometido a fenómenos aluvionales, siendo numerosos los casos registrados de daños provocados por eventos torrenciales (Fernández et al., 1999; Vich y Pedrani, 2002, Guisasola, 2010). Las perturbaciones antrópicas (deforestación, avance urbano, etc.) desequilibran la dinámica natural, con el consecuente aumento de los escurrimientos superficiales.

Descripción geomorfológica/geológica

La cuenca está situada en el ambiente de precordillera y piedemonte. Geológicamente se distinguen el Grupo Villavicencio, y las Formaciones (Fm) Río Mendoza y Mal País, (Harrington, 1941) con presencia de grauvacas, pizarras, lutitas y conglomerados finos. Rocas riolíticas y andesíticas afloran en el cauce A° seco Casa de Piedra cubriendo en discordancia angular a rocas del Grupo Villavicencio. La Fm Río Mendoza representa el inicio de un ciclo sedimentario compuesto por conglomerados (guijarros a bloques) con matriz arenosa pelítica y areniscas.

La red de drenaje presenta una morfología muy accidentada con tramos de fuerte pendientes (>20%). Esta característica provoca el transporte de grandes masas de sólidos a través de aluviones, siendo el típico fenómeno de remoción en masa observado en la cuenca como desmoronamientos, deslizamientos de masas de rocas y de detritos, caídas de masas de rocas y de detritos y flujos de barro o de tierra (Moreiras, 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de la cuenca de aporte

La cuenca del A° seco Casa de Piedra y sus subcuencas, se estimaron utilizando un modelo digital elevación (MDE) de distribución global y gratuita obtenido de la SRTM¹ con pixel de 90 m, remuestreado a 50 m. Siguiendo la metodología propuesta en Burgos y Salcedo (2014) con el objeto de validar hidrológicamente el MDE, se llevaron a cabo una serie de geoprocесamientos con Geo-HMS (HEC, 2000) consistiendo en el forzado hidrológico a partir de la introducción de una red de drenaje digitalizada por fotointerpretación satelital. Obtenido el MDE corregido, comúnmente denominado “hidro-MDE”, se procesan los algoritmos destinados a obtener mapas de dirección, acumulación de flujo y red de drenaje, y finalmente la cuenca.

El mapa de flujo indicado en Figura 10, representa en un punto determinado, la cantidad de píxeles que drenan a él (Burgos, 2005), y por medio de éste se identifica la red de drenaje. El umbral para definir cauce de primer orden se estableció en 1 km². La delimitación de subcuencas se muestra en Figura 11. Los parámetros morfométricos se presentan en la Tabla 8.

Cálculo de las pérdidas de precipitación

La determinación del potencial de escurrimiento realizada en función del número de curva (CN) fue llevada a cabo de forma distribuida utilizando números primos y tablas de clasificación cruzada según Burgos, (2008).

Prácticamente la totalidad de la superficie de la cuenca mantiene su cobertura natural, exceptuando caminos de tierra y senderos pedestres. Para la confección del mapa de cobertura y tipología vegetal, se utilizó el mapa provincial de vegetación (Roig, et al. 1996) (Figura 2) y un mapa de índice de vegetación normalizado obtenido mediante imagen Landsat (Figura 3).

Combinando el mapa de suelos del INTA (Moscatelli, G. 1990) con el mapa geomorfológico provincial (Abraham, E. 1996) incluyendo modificaciones en los sectores de cauce aluvional, se confeccionó el mapa de grupo hidrológico de suelo (GHS). Rocas expuestas con escaso a nulo desarrollo de suelo le corresponde el grupo D (máximo potencial de escurrimiento), y cauces arenosos a franco arenoso el grupo B (medio potencial

¹ En la misión SRTM se obtuvo un modelo digital cuasi global de elevaciones con una uniforme calidad y alta resolución. Fue realizado en cooperación entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), el *German Aerospace Center* (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y el *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA). Werner M. (2001)

de escurrimiento). La asignación de CN se muestra en Tabla 1, teniendo en cuenta a Fattorrelli y Fernández (2007) y Martínez Carretero, (1993).

Tabla 1.- Asignación de CN por tabulación cruzada entre mapas de Cobertura y tipología de vegetación, Suelos y Geomorfología

Clase de Vegetación	Especies	Cobertura	Grupo Hidrológico de Suelos	
			B	D
(Estepa de altura) Vegetación de la vertiente oriental	<i>Adesmia horrida, Mulinum spinosum, Nassauria axillaris</i>	Baja		57
		Media		52
(Matorrales y cactáceas) Matorrales húmedos	<i>Junellia scoparia, Colliguaya intergerrina, Schinus fasciculatus y grandes cactáceas</i>	Baja	77	68
		Media	72	66
		Alta	68	64
Jarillal de Piedemonte	<i>Larrea divaricata, Stipa tenuis</i>	Baja	57	87
		Media	52	85
		Alta	49	83

Finalmente según la expresión (1) propuesta en Huang et al (2006) se realiza un ajuste del valor de CN (Figura 4) utilizando la pendiente del terreno (obtenida de la derivada primera del MDE).

$$CN_{II\alpha} = CN_{II} \frac{322.79 + 15.63 \cdot \alpha}{\alpha + 323.52} \quad (1)$$

donde α es la pendiente [%] y CN_{II} es el valor de CN en condición de humedad II.



Figura 2.- Tipos de vegetación



Figura 3.- Desarrollo vegetal

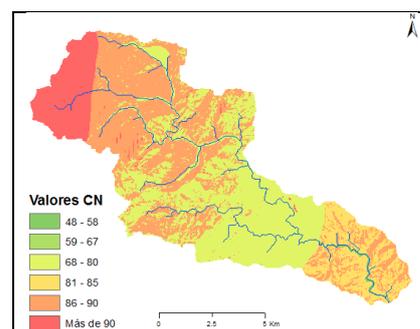


Figura 4.- Mapa valores de $CN_{II\alpha}$

EVENTO DEL 24/01/07

El día 24/01/07 se produjo un evento de crecida sobre el A° Challo que colmató de piedras y sedimentos el canal Las Heras. Los registros de precipitación indican una lámina acumulada en estación Casa de Piedra de 41 mm en 2 hs. La ubicación temporal de las celdas, según radar San Martín (DACC, 2016), se indica en Figura 5, donde se denota el movimiento y la unión de celdas convectivas y la posición de máxima intensidad a las 20:44 hs.

Tormenta de diseño

Las curvas de intensidad, duración y frecuencia utilizadas son las estimadas para el Gran Mendoza (INA CRA, 2008). Se utilizó una tormenta de 1 hora de duración y recurrencias de 5, 25, 50 y 100 años (Tabla 2).

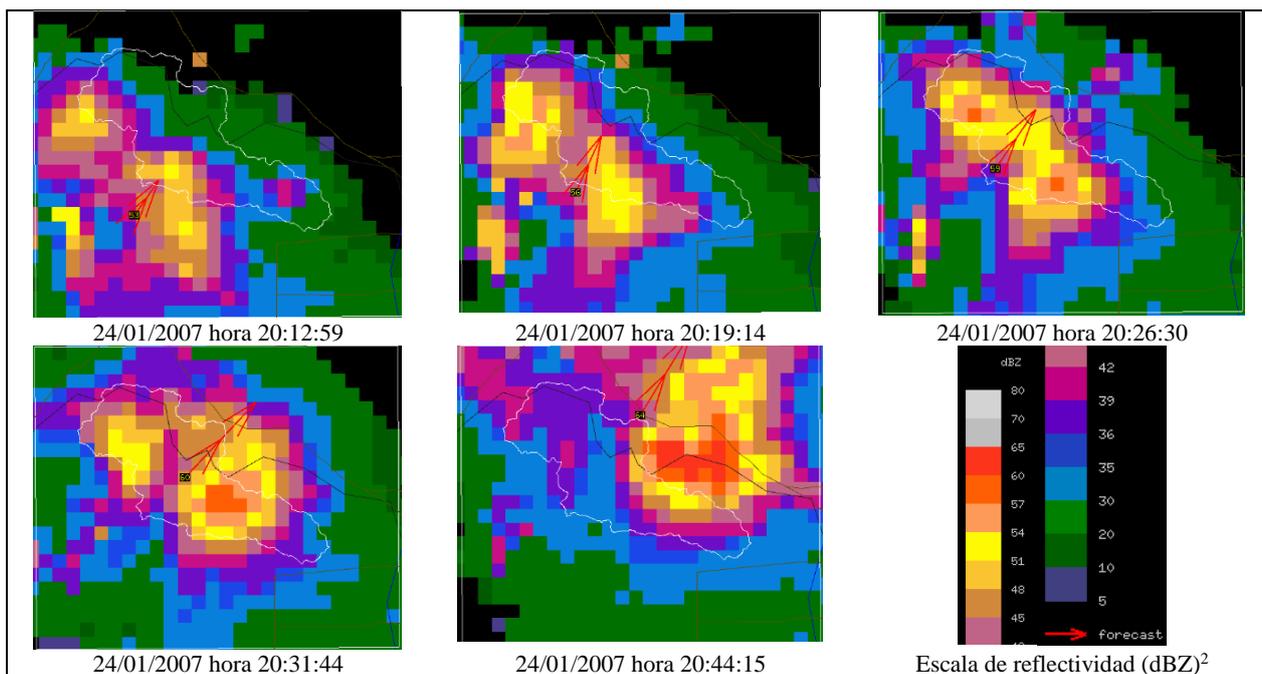


Figura 5.- Secuencia de imágenes radar del evento del 24/01/07 (en blanco borde de cuenca)

Tabla 2.- Distribución temporal de tormentas de proyecto

Duración [min]	TR 5 acum [mm]	TR 25 acum [mm]	TR 50 acum [mm]	TR 100 acum [mm]
5	1.8	2.7	3.1	3.4
10	6.0	8.9	10.1	11.3
15	11.5	17.1	19.4	21.7
20	17.5	26.1	29.6	33.1
25	23.6	35.0	39.8	44.5
30	29.2	43.4	49.3	55.1
35	34.1	50.6	57.4	64.2
40	37.9	56.3	63.9	71.5
45	40.7	60.4	68.6	76.7
50	42.4	62.9	71.4	79.9
55	43.1	64.0	72.7	81.2
60	43.2	64.2	72.9	81.5

La lámina media de precipitación ponderada por área (indicadas en Tabla 3), se calculó para tres posiciones de ubicación del núcleo de tormenta ubicadas en cuenca alta (Posición I), cuenca media (Posición II) y cuenca baja (Posición III), mostradas en Figura 6 y con un decaimiento espacial por medio de isohietas patrones elípticas respetando la ecuación (2). Se agrega una cuarta ubicación de núcleo de acuerdo al evento registrado el 24 de enero de 2007 (Figura 6d). Esta ubicación de núcleo de tormenta se encuentra cerca de la posición III simulada.

² Los valores de reflectividad (dbz) son más importantes en relación con la intensidad probable de la lluvia. Dbz>50 lluvia intensa, dbz>45 lluvia medianamente intensa, dbz 30-40 lluvia moderada, dbz<30 llovizna, WMI, 1999

$$\% \text{ Lluvia puntual} = 1 - 0.7632 \cdot (1 - e^{-0.00769 \cdot A}) \quad [\%] \quad (2)$$

donde: A es el área de cuenca [km²]

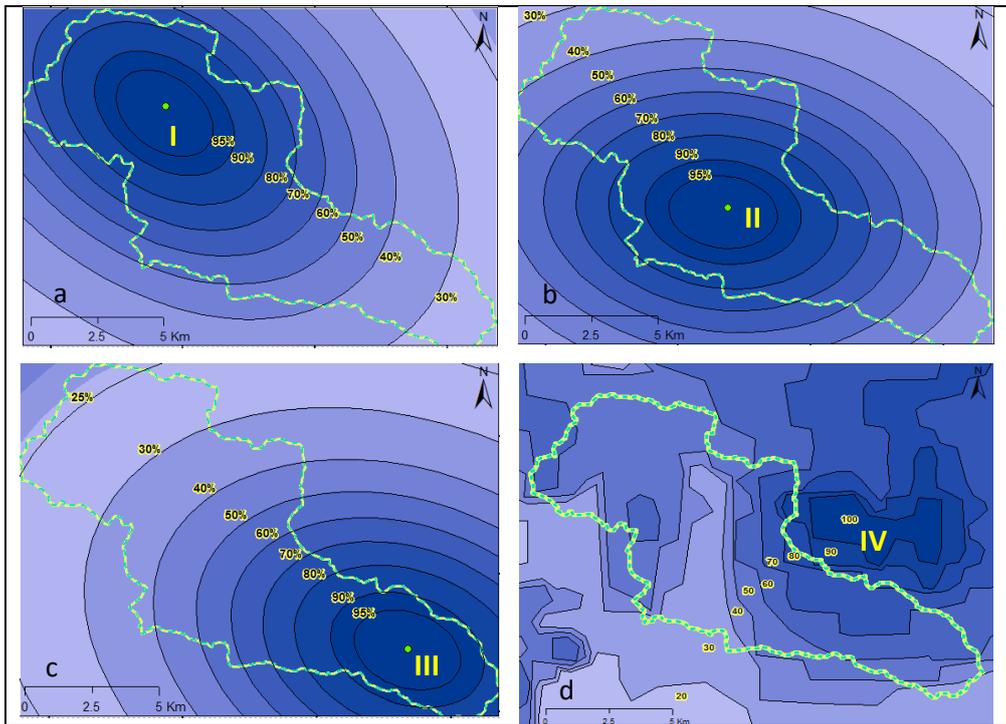


Figura 6.- Posiciones y decaimiento espacial de tormenta (a, b y c: tormentas de diseño; d: evento 24/1/07)

La modelación hidrológica se realizó en el programa ArHymo (Fornero et al, 2002). El esquema topológico para la simulación se observa en Figura 7 donde las subcuencas están representadas por cuadrados verdes, los nodos (suma de caudales) por círculos rojos y los tramos de tránsito por los vectores de conexión.

Tabla 3.- Lámina media de precipitación porcentual ponderada arealmente por subcuenca

Posición Núcleo	301	302	303	304	305	306	307	308
I	83.8	84.6	91.9	90.6	81.0	69.0	58.6	33.1
II	40.9	47.7	73.6	71.4	91.3	80.1	87.6	51.2
III	27.6	27.0	38.2	32.5	43.2	60.5	62.1	92.8
24/01/07	48.9	49.8	36.6	49.2	39.4	66.1	43.5	58.2

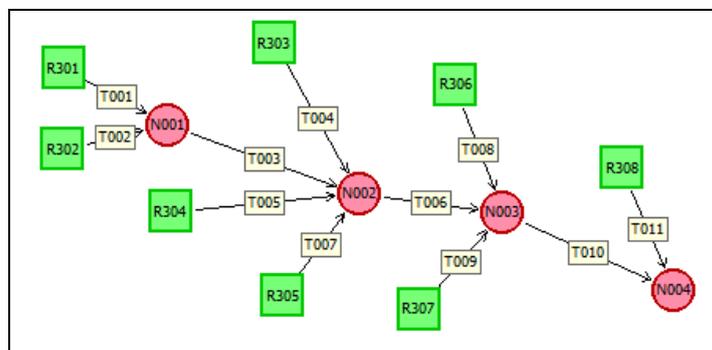


Figura 7.- Esquema topológico de la cuenca Casa de Piedra.

Tiempo de concentración y comparación de 3 métodos para obtención de isocronas

El tiempo de concentración define la rapidez de la respuesta de una cuenca ante una precipitación efectiva (Mintegui Aguirre y Robledo Sánchez, 1993). De acuerdo a Chow, et al (1994) el tiempo de tránsito del flujo desde un punto de la cuenca hasta otro puede deducirse a partir de la distancia y la velocidad de flujo. El tiempo para el cual toda la cuenca empieza a contribuir es el tiempo de concentración t_c . Para su estimación existen numerosas expresiones empíricas, utilizando en este trabajo las indicadas en Tabla 4.

Tabla 4.- Expresiones para el tiempo de concentración

Autor y año	Expresión [hs]	Dimensiones
Kirpich (1940)	$t_c = (0,00013 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385}) / 60$	L [pie]; S [pie/pie]
California Culverts Practice (1942)	$t_c = (0,87 \cdot L^3 / H)^{0,385}$	L [km], H [m]
Johnstone y Cross (1949)	$t_c = (300 \cdot (L/S)^{0,5}) / 60$	L [mi], H [pie]
Kerby (1959)	$t_c = 1,77 \cdot n^{0,47} \cdot A^{0,36}$	A [km ²], n=0.05
Bransby-Williams (1974)	$t_c = 0,97 \cdot L \cdot A^{-0,1} \cdot S^{-0,20}$	L [km], A [km ²], S [m/km]
Bruce y Clark (1974)	$t_c = 3,05 \cdot n^{0,47} \cdot L^{0,47} \cdot S^{-0,23}$	L [km], S [m/km], n=0.05
Pilgrim y McDermott (1982)	$t_c = 0,76 \cdot A^{0,38}$	A [km ²]
Flavel (1983)	$t_c = 2,31 \cdot A^{0,54}$	A [km ²]
Black et al (1986)	$t_c = 1,02 \cdot A^{-0,113} \cdot S^{-0,215} \cdot L^{1,015}$	L [km], A [km ²], S [m/km]
Pezzoli (1988)	$t_c = 0,055 \cdot L \cdot S^{-0,5}$	L [km], S [m/m]
Rziha (1999)	$t_c = 0,014 \cdot L^{1,6} \cdot H^{0,6}$	L [km], H [m]
DNOS (2005)	$t_c = (10/K \cdot (A^{0,3} \cdot L^{0,2}) / S^{0,4}) / 60$	L [m], A [km ²], S [%], K=4.5

Para el cálculo de la velocidad de flujo sobre la cuenca Casa de Piedra, se utilizaron 3 métodos los cuales luego se transformaron a tiempos en horas para obtener fajas de tiempo o isocronas.

Mapa de Isocronas (método I)

Fleckenstein (1998), Nurünnisa Usul y Musa Yilmaz (2004) utilizan la ecuación de Manning para calcular una grilla de velocidad superficial en un entorno SIG, en función de la expresión (3). Estas tres variables se mapean en grillas y se procesa por álgebra de mapas.

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{i} \quad (3)$$

donde R es el radio hidráulico RH [m], i es la pendiente [m/m] y n el coeficiente de rugosidad de Manning.

La grilla de valores de Manning (Figura 8) se obtuvo a partir del mapa geomorfológico y de vegetación, sumado a observación de campo y fotográfica. Para estimar radios hidráulicos (Figura 9) se realizó una fotointerpretación de la grilla de flujo sobre imágenes de alta resolución midiendo anchos de cauce.

Mapa de Isocronas (método II)

Sorrell (2010) obtiene la grilla de velocidades utilizando las pendientes i [%] y un coeficiente K que depende del tipo de flujo, (obtenido de las grillas de flujo y RH), de acuerdo a Tabla 5 y a la expresión (4).

$$v = K \cdot \sqrt{i} \quad (4)$$

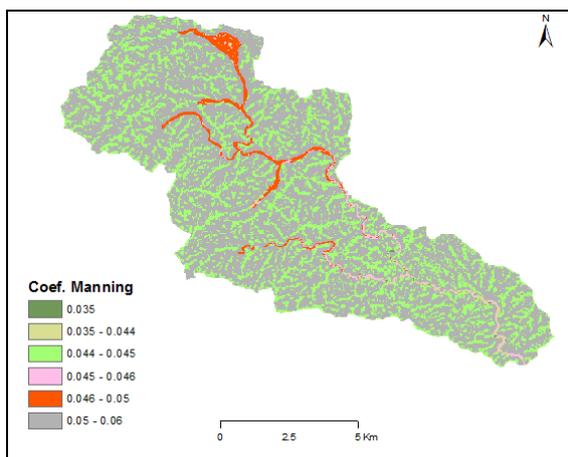


Figura 8.- Coeficiente de rugosidad de Manning

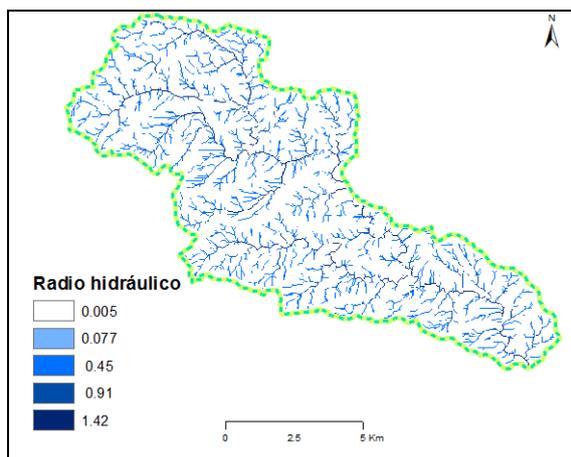


Figura 9.- Radio hidráulico

Tabla 5.- Coeficiente K de acuerdo al radio hidráulico

Radio hidráulico	K
0,005	0,15
De 0,08 a 0,45	0,37
De 0,91 a 1,42	0,64

Mapa de Isocronas (método III)

Cazorzi (2002) desarrolló una serie de algoritmos para análisis hidrológicos mediante su modelo Woditem Higríd2K2, uno de los cuales permite estimar tiempos de tránsito, utilizando mapas de acumulación de flujo.

$$si [flow_{acum}] > 400 \rightarrow v = 2 \left(\frac{flow_{acum}}{400} \right)^{0.07} [m/s] \quad (5)$$

$$si 400 > [flow_{acum}] > 40 \rightarrow v = 2 [m/s] \quad (6)$$

$$si [flow_{acum}] < 40 \rightarrow v = 0.5 [m/s] \quad (7)$$

La ecuación (5) expresa que si el área drenada supera un umbral de 400 celdas (1 km²) la velocidad estará en función del área drenada con un mínimo de 2 m/s. La ecuación (6) expresa la velocidad en cauce (v=2 m/s) cuando el área se encuentra entre el mínimo y el máximo umbral. Por último, (7) define la velocidad en ladera cuando el área drenada no supere las 40 celdas (10 Ha) igual a 0.5 m/s.

PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Método Gravilovic

La metodología de Gavrilovic (Gavrilovic, 1959 citado en Brea y Spalleti, 1999) está basada en un modelo empírico que estima el volumen de sedimentos por erosión de una cuenca, el cual es transportado por los cauces. Considera que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores como el clima, la litología, el uso del suelo y la topografía entre otros. La expresión del volumen anual de sedimentos producidos

y transportados (G) es función de la producción promedio anual de sedimentos (W) y el coeficiente de reposición o de retención de sedimentos (R), según (8) a (10).

$$G = W \cdot R \quad [m^3/año] \quad (8)$$

$$\text{donde: } W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^3 \cdot F_c \quad [m^3/año] \quad (9)$$

$$\text{y } R = \frac{[(O \cdot D)^{1/2} \cdot (L + Li)]}{[(L + 10) \cdot F]} \quad (10)$$

T es el coeficiente de temperatura obtenido de $T = \left[\left(\frac{t}{10}\right) + 0.1\right]^{1/2}$ donde t es la temperatura media anual, h la precipitación media anual [mm/año].

F_c es la superficie de la celda (pixel) [km²], por lo que la producción total de la cuenca se obtendrá de la integración de los valores distribuidos en la grilla.

Z es el coeficiente de erosión expresado como $Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + i^{\frac{1}{2}})$ donde X es el coeficiente de uso del suelo ($X_{\text{adoptado}}=0.7$ en laderas y 0.9 en cauces), Y el coeficiente de resistencia a la erosión del suelo ($Y_{\text{adoptado}}=0.8$ en laderas y 1.3 en cauces), φ el coeficiente que evalúa los procesos de erosión observados ($\varphi_{\text{adoptado}}=0.9$) e i es la pendiente [m/m].

Para el factor de depositación (R), O es el perímetro de la cuenca [km], D es la diferencia del nivel medio de la cuenca (elevación media de la cuenca menos la mínima elevación) [km], Li la longitud total de los tributarios laterales de la cuenca [km] y L es la longitud del cauce principal [km]. Se consideró analizar a la cuenca en su totalidad y discretizada por subcuencas.

Método RUSLE

El método revisado de la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE por su sigla en inglés) fue ampliamente utilizado, con la siguiente expresión:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (11)$$

donde,

A = Pérdida de suelo promedio anual en [t/ha año]

R = Factor erosividad de las lluvias en [J cm / m² h], Vich (2007) propone la expresión (12)

K = Factor erodabilidad del suelo en [t m² h / ha J cm]

LS = Factor topográfico (función de longitud-inclinación-forma de la pendiente), [adimensional]

C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal), [adimensional]

P = Factor de prácticas de conservación, [adimensional] (P=1 debido a la inexistencia de cultivos)

$$R = 0.0052 \cdot P^{0.91} \cdot I30^{1.38} \quad (12)$$

donde: P es la precipitación acumulada del evento (se considera una recurrencia de 50 años igual a 72.9 mm), e I_{30} es la intensidad de la lluvia en 30 minutos igual a 113.5 mm/h, de acuerdo a las IDF del Gran Mendoza.

K y C son obtenidos de Ibañez et. al (2003) donde se toma en consideración la litología y la cobertura vegetal, indicando los valores adoptados en Tabla 6. LS es obtenido mediante reclasificación de la grilla de pendiente y se indica en Tabla 7. Los intervalos de las clases son de acuerdo a Mintegui y Robredo (1999).

Tabla 6- Factores K y C

Cobertura vegetal	C	Litología	K
Estepa de altura de BC	0.16	Laderas (areniscas)	0.3
Estepa de altura de MC	0.11	Cauces (gravas y arenas)	0.2
Matorrales y cactáceas de BC	0.19	Cobertura vegetal	C
Matorrales y cactáceas de MC	0.13	Jarillal de BC	0.13
Matorrales y cactáceas de AC	0.082	Jarillal de MC	0.082
		Jarillal de AC	0.041

Tabla 7.- Factor topográfico LS

Límites de gradiente	Factor LS
$p < 3$	0.25
$3 < p < 12$	1.45
$12 < p < 20$	3.40
$20 < p < 30$	7.55
$p < 30$	14.60

RESULTADOS: AVANCES EN EL CONOCIMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA CASA DE PIEDRA

Parámetros morfométricos

El cauce principal, denominado A° Casa de Piedra nace en las estribaciones del cerro Pelado por sobre los 3450 msnm, para confluir con el A° San Isidro formando el A° Challao. Su recorrido total es de unos 29.7 km con un desnivel que supera los 2270 m y un área total de aporte de 96.5 km².

Tabla 8.- Parámetros morfométricos subcuencas arroyo Casa de Piedra

Sub cca	Área [Km ²]	Perím. [Km]	Cota máx. [msnm]	Cota mín. [msnm]	Curso más largo [Km]	ΔH [m]	Pendiente [m/m]	CN II _a	Abstracc. Inicial [mm] $I_a = S^{0.55}$
301	9.5	18.0	3107	2440	7.5	667	0.089	87.0	7.4
302	12.9	19.8	3401	2447	7.8	954	0.122	92.4	5.3
303	5.5	11.6	2661	2210	5.5	451	0.082	83.8	8.5
304	9.8	14.7	3121	2308	7.2	813	0.112	83.8	8.5
305	5.6	12.3	3083	2210	6.6	873	0.133	83.3	8.7
306	16.8	22.3	2651	1582	11.2	1069	0.096	79.4	10.0
307	18.6	22.9	2861	1573	11.9	1288	0.108	78.4	10.3
308	17.9	21.0	2154	1129	9.1	1025	0.112	81.1	9.4
Tot.:	96.5	60.1	3401	1129	29.7	2272	0.076		

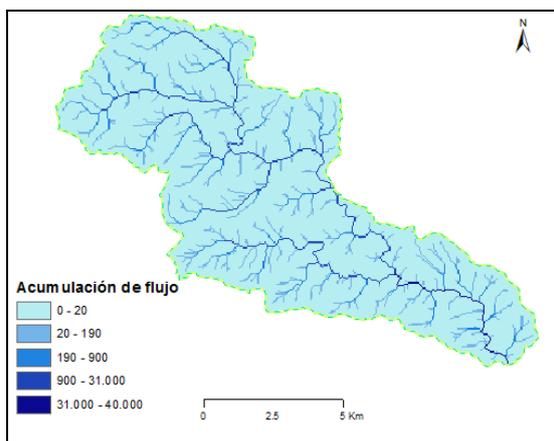


Figura 10.- Acumulación de flujo

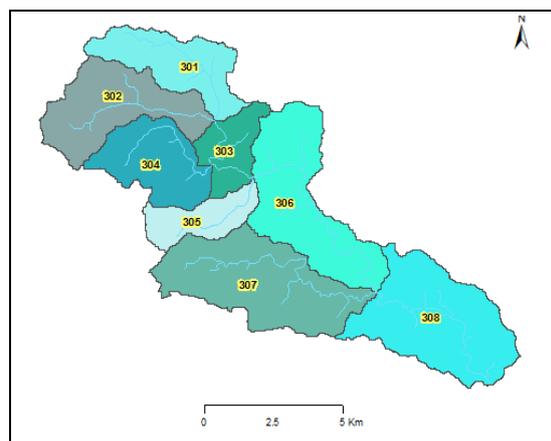


Figura 11.- Subcuencas

Tiempo de Concentración de la cuenca

En Tabla 9 se presentan los tiempos estimados para la cuenca total. Se observa gran dispersión de resultados con una desviación de 2.6 hs, desestimando los resultados de la ecuación de Flavel.

Tabla 9.- Tiempos de concentración

Autor y año	Tc [hs]	Autor y año	Tc [hs]
Kirpich (1940)	2.4	Pilgrim y McDermott (1982)	4.3
Johnstone y Cross (1949)	1.1	Flavel (1983)	19.9*
Kerby (1959)	2.2	Black et al (1986)	7.5
Bransby-Williams (1974)	7.7	Pezzoli (1988)	5.9
Bruce y Clark (1974)	1.4	Rziha (1999)	5.2
DNOS (2005)	1.0	Mediana	3.35
		Media total	3.87
		Desvío Estándar	2.60

Se adopta el valor de la media como estimación del tiempo de concentración de la cuenca, la cual se encuentra entre los valores calculados con las ecuaciones de Kirpich y Pilgrim & McDermott.

Caudales resultantes

En Tabla 10 se presentan los caudales máximos instantáneos totales (en nodo N004) estimados para las tres posiciones del núcleo de tormenta, y para cuatro recurrencias. En Figura 12 se presentan los hidrogramas.

Tabla 10.- Caudales máximos (Q), tiempo al pico (Tp) y Volúmenes (V) al cierre de la cuenca (nodo IV) en función de la posición del núcleo de tormenta

	Posición I				Posición II				Posición III			
	TR5	TR25	TR50	TR100	TR5	TR25	TR50	TR100	TR5	TR25	TR50	TR100
Q [m ³ /s]	116.5	242.3	300.2	359.5	82.6	190.0	241.8	295.5	41.8	102.0	132.1	164.1
Tp [hs]	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	1.6	1.7	1.7	1.7
V [Hm ³]	0.72	1.56	1.95	2.35	0.58	1.36	1.73	2.12	0.34	0.88	1.14	1.42

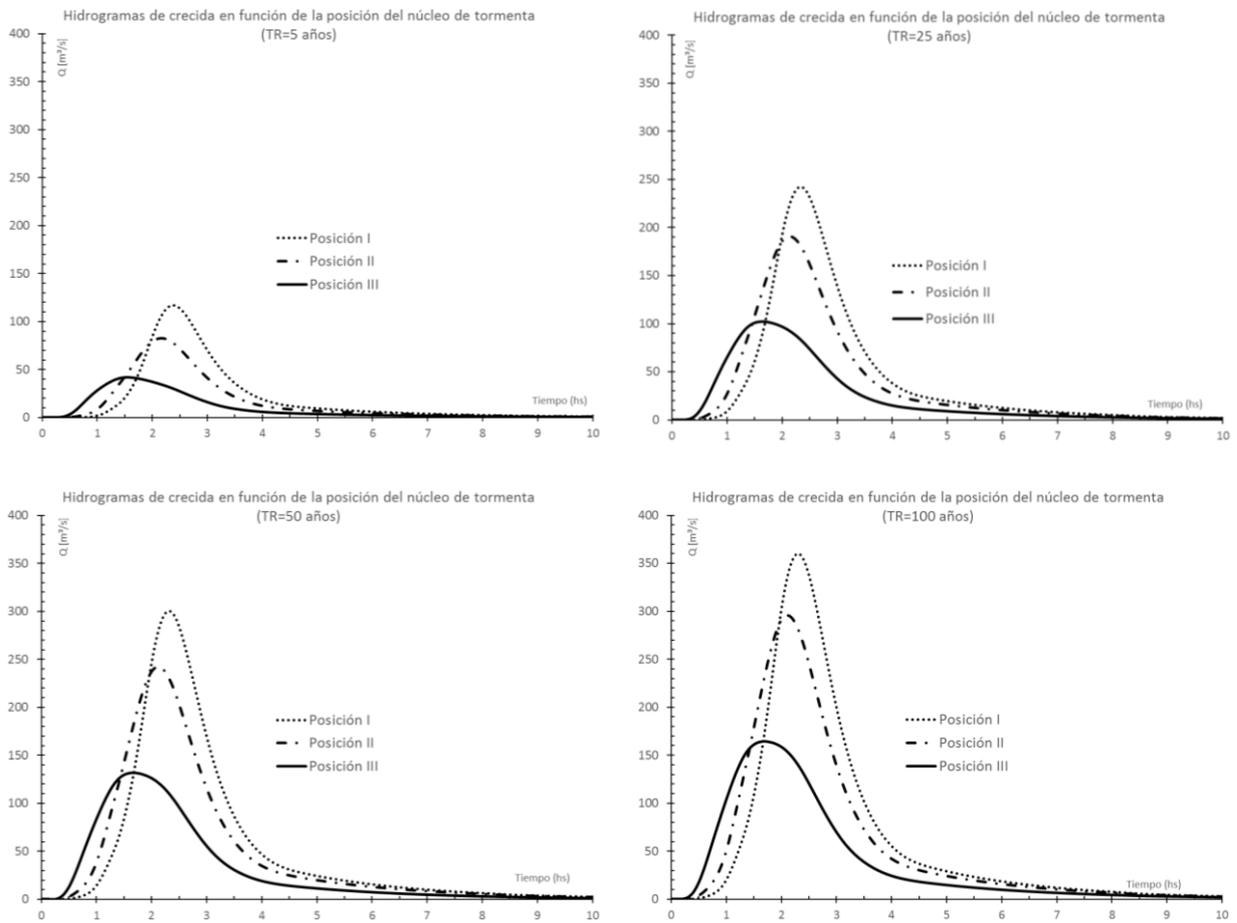


Figura 12.- Hidrogramas simulados al punto de cierre de la cuenca para distintos TR y escenarios

Mapas de Isocronas

En las Figuras 13 a 15 se presentan los mapas de isocronas, identificando la variabilidad de resultados (utilizando la misma banda de colores). Para el caso de los métodos Fleckenstein y Cazorzi, el tiempo de concentración de la cuenca está en 2.5 y 3.5 hs, sin embargo, existe gran variación de la disposición espacial y altitudinal de las fajas horarias. Por ejemplo, con el método III (Cazorzi) la isocrona de 30 minutos alcanza los 1600 msnm, mientras que en Fleckenstein supera los 2000 msnm.

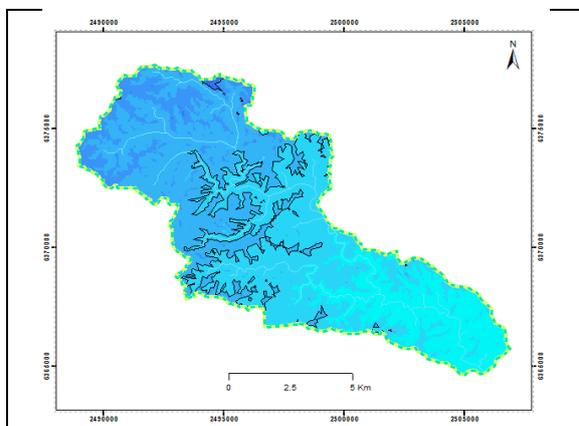


Figura 13.- Mapa isocronas método Fleckenstein

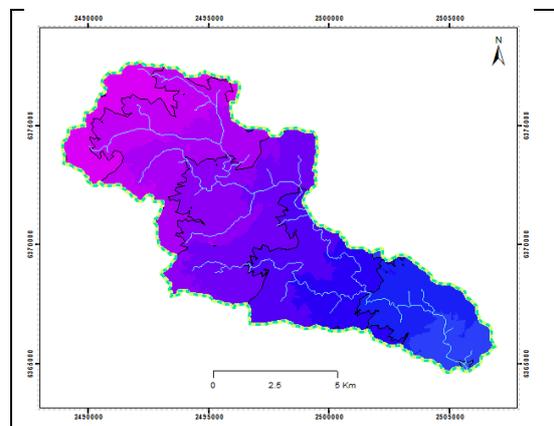


Figura 14.- Mapa isocronas método Sorrell

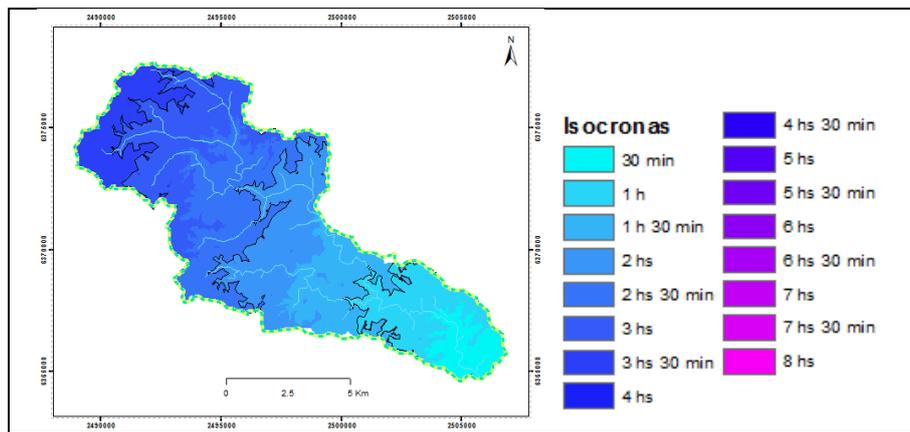


Figura 15.- Mapa isocronas método Cazorzi

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO SEDIMENTOLÓGICO DE LA CUENCA CASA DE PIEDRA

De acuerdo al método de Gavrilovic el mapa de producción promedio anual de sedimentos (W) estimado para cada celda de 2500 m² varía en un rango de 18 a 742 m³/año. El coeficiente de retención de sedimentos (R) calculado para la totalidad de la cuenca otorga un valor de 0.2, y discretizado a nivel de subcuenca, varía entre 0.08 a 0.15. El valor final del volumen de sedimentos producido y transportado a la salida de la cuenca (G) se observa en la Figura 16. Integrando los valores por celda, a la salida de la cuenca se obtiene un valor entre 0.76 a 1.3 Hm³/año. Analizado por unidad de superficie, se puede indicar una tasa de producción y transporte de entre 130.7 a 222.3 t/año km².

El mapeo de la erosión hídrica siguiendo la metodología RUSLE, se indica en Figura 17 y se observan valores de hasta 147 t/año km².

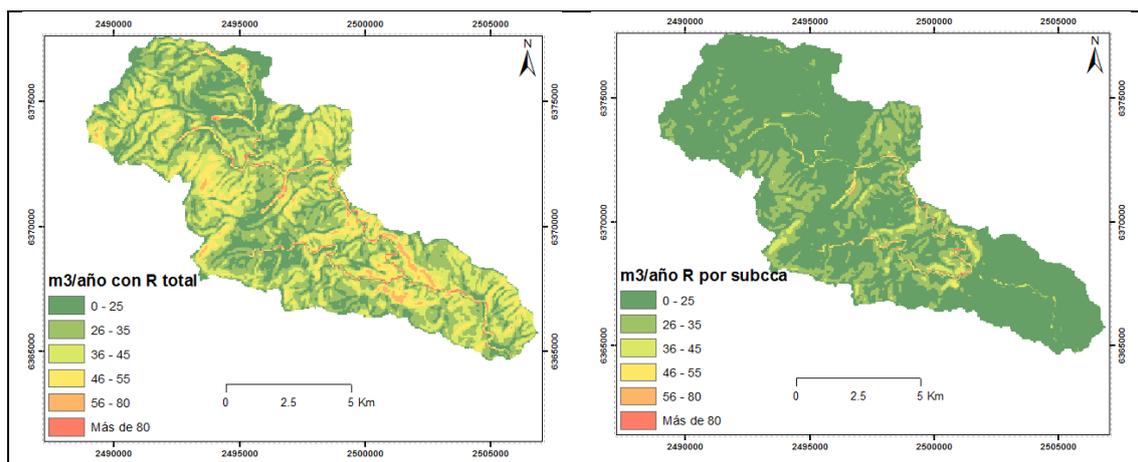


Figura 16.- Mapa de producción y transporte anual de sedimentos (Gavrilovic)

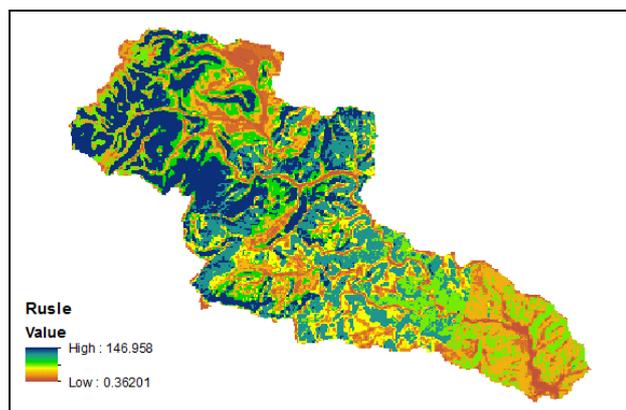


Figura 17.- Mapa de pérdida de suelo (RUSLE)

CONCLUSIONES

Se estimaron caudales de crecidas para distintas recurrencias de tormentas, encontrando que la situación crítica corresponde a una ubicación de núcleo de tormenta en la cabecera de la cuenca, con hidrogramas simulados que superan los 350 m³/s para una recurrencia de 100 años.

Analizando la ubicación del núcleo de tormenta, una situación con núcleo en la zona baja, produce hidrogramas de hasta un 50% menos, con tiempos de respuesta hasta un 60% más rápido.

Los tiempos de concentración calculados con las 11 ecuaciones, oscilan entre 1 y 7.7 hs con una media de 3.87 hs y un desvío de 2.6 hs. Se recomienda para zonas de similares características, la utilización de las ecuaciones de Kirpich y Pilgrim & McDermott por ser las más próximas al valor promedio.

Por otro lado, los máximos valores de los mapas de isocronas estimados, indican tiempos de 2.5, 7.5 y 3,5 hs, encontrando que el método de Cazorzi es el más cercano al valor medio del tc.

Respecto a la estimación de carga sólida de los hidrogramas simulados utilizando métodos de producción de y transporte de sedimentos, se prevé para futuros estudios, un análisis y verificación de las cargas sólidas simuladas, calibrando coeficientes del modelo de erosión.

Estos resultados, una vez validados con información observada (o estimada en función del análisis de la crecida histórica del 24/01/07) servirán de base para calcular las isocronas del resto de las cuencas aluvionales del piedemonte mendocino, incorporando así otro nivel de información necesario para la toma de decisiones dentro del Sistema de Alerta Hidrometeorológico que dispone el INA CRA.

BIBLIOGRAFÍA

Abraham, E. (1996). *Mapa Geomorfológico Mendoza sector Norte*. Junta de Andalucía, Gobiernos y Universidades de la Región Andina Argentina. Inventario de Recursos de la Región Andina Argentina. Sistema Físico Ambiental de Cuyo. Provincia de Mendoza.

Brea, J.D y Spalletti, P.D (1999). “*Sediment yield due to Surface erosion in andine basins*” in Dynamics of water and sediments in mountain basins. Mario Lenzi (ed) Quaderni di Idronomía Montana N°20.

- Burgos, V. H. (2005). "Modelación Hidrológica de Cuencas Piedemontanas. Uso de Sistemas de Información Geográfica en Hidrología Superficial" en XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza
- Burgos, V. H. (2008). "Estimación de la distribución espacial del Número de Curva en cuencas piedemontanas del Gran Mendoza aplicando técnicas SIG" en Workshop Internacional de Aplicaciones de SIG en Hidrología, FICH Univ. Nac. del Litoral.
- Burgos, V. Salcedo, A. P. (2014). "Modelos digitales de elevación: tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información" Acta de Resúmenes, 2do Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, INA. ISBN 978-987-45194-2-9.
- Cazorzi, F. (2002). Hygrid 2K2 Hydrological Model, WODITEM (Watershed Oriented Digital Terrain Model) Università degli studi di Udine
- Chow; V.T.; Maidment, D.; Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. MacGraw-Hill Interamericana, S.A. Santa Fé de Bogotá, Colombia
- DACC (2016). Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas. Imágenes del Radar meteorológico San Martín
- Fattorelli, S. Fernández, P. (2007). Diseño Hidrológico. Zeta Editores. Mendoza, Argentina.
- Fernandez, P.C, Fornero, L.A, Rodriguez, S. (1999). Sistemas hidrometeorológicos en tiempo real. Lluvias, Tormentas y alerta Hidrológica de Mendoza. Serie de la Acad.Nac. de Agron. y Vet. N°27
- Fleckenstein, J. (1998). Using GIS to derive Velocity Fields and Travel Times to Route Excess Rainfall in a Small-Scale Watershed. Univ. of California Davis.
- Fornero, L., Pavese, A., Maza, J.; Vega, D., (2002). "Actualización del modelo hidrológico ARHYMO". Congreso Nacional del Agua, Carlos Paz, Córdoba.
- Guisasola, E. (2010). "Situación actual de la ciudad de Mendoza. Su sistema de mitigación de crecidas" en *Amenazas naturales de origen hídrico en el centro-oeste árido de Argentina*" Vich, A.; Gudiño M.E. (editores) Edit. Fund. Univ. Nac. de San Juan.
- Harrington, H. J. (1941). *Investigaciones geológicas en las sierras de Villavicencio y Mal País, provincia de Mendoza*. Dir. Min. y Geol, Bs.As. Bol.49.
- HEC (2000) Hydrologic Engineering Center, HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension. *User's Manual* U.S. Army Corps of Engineers. U.S.A.
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z., Goulet, M. (2006). "A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China". *Hydrological processes*, 20(3), 579-589.
- INA-CRA (2008) "Tormenta de Proyecto para el Pedemonte del Gran Mendoza"
- Martínez Carretero, E. (1993). Carta de vegetación del sector cerro Casa de Piedra-San Isidro (Hoja Mendoza 230-21). *Multequina*, 2, 89-140.
- Mintegui Aguirre, J. Robledo Sánchez, J. (1993). "Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica". Manual para un programa básico. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Monte. Fundación Conde del Valle de Salazar.
- Moreiras SM (2010). *Geomorphologic evolution of the Mendoza River Valley*. In: del Papa C, Astini R (eds) Field excursion guidebook, 18th international sedimentological congress, Mendoza, FE-B2, p 20
- Moscatelli, G. (1990). Atlas de suelos de la República Argentina. INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Nurünnisa Usul. Musa Yilmaz (2004). *Estimation of instantaneous unit hydrograph with clark's technique in GIS*. METU, Civil Eng. Department, Ankara, Turkey.
- Roig, F.; Martínez Carretero, E.; Mendez, E. (1996). Mapa de Vegetación de la Provincia de Mendoza. Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA)-CRYCIT-MENDOZA-ARGENTINA. (1: 1.000. 000). *Multequina*, 5.
- Sorrell, R.C. (2010). *Computing Flood Discharges For Small Ungaged Watersheds*. Michigan Department of Natural Resources and Environment Land and Water Management Division
- Vich, A. I., Pedrani, A. (2002). "La erosión hídrica en el piedemonte árido de Mendoza" en IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales. Darío Trombotto y Ricardo Villalba, editores.
- Vich, A. I (2007). "Estimación del factor de erosividad en áreas de piedemonte, próximo al Gran Mendoza (Argentina)" en *Rev. Geog.* (141):145:164
- Weather Modification Inc. (1999). Información del Radar de Cruz Negra (Mendoza)
- Werner M. (2001). *Shuttle Radar Topography Mission. Mission overview*. *Journal of Telecommunication* 55, 75-79.