

SIMULACION DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA ANTE EL MOVIMIENTO DE UNA TORMENTA

Juan F. Weber, Eliana Jorquera y Pablo T. Stehli

*Laboratorio de Hidráulica, Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina, Córdoba, Argentina,
jweber@civil.frc.utn.edu.ar, ejorquera@civil.frc.utn.edu.ar, 51485@civil.frc.utn.edu.ar
<http://www.frc.utn.edu.ar>*

Palabras Clave: hidrología superficial, modelos hidrológicos distribuidos, TREX, GRASS GIS

Resumen. Se presenta la aplicación del modelo hidrológico distribuido TREX, para obtener los hidrogramas de crecida en la cuenca del río La Suela (pcia. de Córdoba) ante el paso de una tormenta hipotética de distinta intensidad, dirección y velocidad del viento. Este tipo de resultados sólo son viables en modelos distribuidos como TREX, ya que los agregados (de uso general en la aplicación ingenieril) no pueden considerar la variabilidad espacial, tanto de las propiedades de la cuenca como de la tormenta.

Los procesos hidrológicos incluyen la precipitación, intercepción, infiltración, almacenamiento en depresiones, flujo terrestre hortoniano y el flujo en los canales. Las pérdidas por intercepción se restan de la precipitación para determinar la precipitación neta que llega a la superficie de la tierra. La infiltración es simulada con las relaciones de Green y Ampt. El flujo superficial se rige por la ecuación de conservación de masa y de momento (St. Venant - onda difusiva) en dos dimensiones. El flujo en los cauces también se rige por la misma ecuación, pero en una dimensión.

Los ingresos claves del modelo son: extensión de la cuenca, modelo digital de elevación (DEM), tipo y uso del suelo que se especifican como mapas raster (GRID) y se obtuvieron directamente con la ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG) GRASS. El resto de los ingresos del modelo también se pueden derivar o inferir a partir de datos de SIG, como por ejemplo la pendiente del terreno y la extensión de la red de drenaje, como así también los parámetros hidrológicos. Además se agregan los campos de precipitación que pueden variar tanto espacial como temporalmente. Los resultados del modelo incluyen resúmenes del caudal como también mapas raster que se pueden importar a GRASS directamente para la visualización y animación de series de tiempo.

La cuenca del río La Suela se encuentra ubicada totalmente en la provincia de Córdoba. Tiene una superficie de 131,8 km² comprendida entre los 900 y los 2200 msnm. La cuenca está localizada en el núcleo central de las Sierras Pampeanas. Hidrográficamente el río de La Suela es tributario del Anizacate, afluente a su vez del Xanaes o Río Segundo. Se utilizó una clasificación de los tipos de suelo de la cuenca según el origen de los materiales de superficie: rocas graníticas, metamórficas o sedimentos aluvionales. Desde el punto de vista del uso del suelo, se clasificó en 5 tipos, según la especie y porcentaje de la cobertura vegetal.

La simulación del desplazamiento de las tormentas se realizó a través de un código escrito a tal fin. Los resultados obtenidos muestran la significativa influencia que desarrolla tanto la dirección como la velocidad del movimiento de la tormenta en los caudales erogados por la cuenca, destacando las potencialidades de los modelos distribuidos para este tipo de análisis.

1. INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico, en términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la unidad hidrológica bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas.

La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua. Hasta mediados del siglo XX, la modelación hidrológica se limitó a tratar de explicar mediante expresiones matemáticas simples, los mecanismos individuales involucrados en los principales procesos del ciclo hidrológico. Entre ellos se pueden nombrar: el método racional, la curva de infiltración de Horton, los trabajos de Thornthwaite y Penman para la estimación de la evapotranspiración, etc.

En la década de los 60, con el advenimiento de la revolución digital, se realizó el primer intento por representar casi en su totalidad al ciclo hidrológico en una cuenca. Surge así el Stanford Watershed Model-SWM de Crawford y Linsley en 1966 (Singh, 1996). Sin embargo, las máquinas disponibles eran caras y muy lentas respecto a los estándares actuales, por lo tanto los programas eran limitados en tamaño y complejidad (Beven, 2001). Como consecuencia, la modelación hidrológica fue planteada principalmente en forma agregada (Vieux, 2004). La aparición de computadoras más potentes, la mayor disponibilidad de datos distribuidos arealmente provenientes de sensores remotos y las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de modelos distribuidos que consideran explícitamente la variabilidad espacial y temporal tanto en las entradas del sistema (precipitación) como de los resultados (contenido de humedad, altura de almacenamiento de agua, infiltración, etc.).

1.1. Motivación

En la provincia de Córdoba (Argentina), entre los meses julio y septiembre se producen numerosos incendios, que afectan a importantes extensiones de su territorio. El fuego, si bien es un componente natural en algunos ecosistemas, puede considerarse como un factor de disturbio debido al fuerte impacto que ejerce sobre los componentes estructurales del sistema. Sus efectos se observan en distintos niveles, siendo las serranías y el pie de monte las áreas más susceptibles de ser afectadas por la erosión, cuando el suelo ha sufrido ese disturbio (Rodríguez et al., 2005).

La ocurrencia de lluvias intensas sobre una zona puede causar el aumento de los escurrimientos en una red de drenaje. Este aumento, es mayor y más repentino en cuencas de las características de la serranía cordobesa. El efecto de los incendios se manifiesta en una alteración de las propiedades de estas crecidas.

La línea de trabajo en la que se enmarca esta comunicación propone implementar un modelo hidrológico distribuido acoplado a un modelo de producción de sedimentos, en una cuenca de la zona serrana de la provincia de Córdoba, con el fin de modelar y estimar las alteraciones producidas por la ocurrencia de los incendios. Con esa finalidad se implementa un modelo hidrológico distribuido y en primer término se analiza

2. LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se los entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden repre-

sentarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes interconectadas entre sí que forman un todo (Chow et al., 1994). Desde este punto de vista, el ciclo hidrológico puede considerarse un *todo* compuesto por: agua atmosférica, agua superficial y aguas subterráneas, entre otros elementos. Este sistema global a la vez puede agrupar parte de sus elementos conformando subsistemas menores que faciliten su comprensión.

Un sistema hidrológico se define como: una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. El objetivo del análisis de estos sistemas, es estudiar la operación del mismo y predecir su salida.

2.1. Clasificación de los modelos hidrológicos

Según Ponce (1994) los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos: estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema.

Siguiendo a Ponce (1994), en la práctica, pueden distinguirse cuatro tipos generales de modelos:

1. Determinísticos: son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.
2. Probabilísticos: por el contrario, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.
3. Conceptuales: son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.
4. Paramétricos: o también conocidos como empíricos o de caja negra. Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico.

Los fenómenos hidrológicos cambian en las tres dimensiones espaciales, pero tener en cuenta toda esta variación, puede hacer que los modelos sean muy complejos. De acuerdo a Chow et al. (1994), los modelos determinísticos y los conceptuales pueden clasificarse en:

1. Modelos agregados: el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones.
2. Modelos distribuidos: considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales.

De acuerdo a la escala temporal, los modelos hidrológicos pueden clasificarse en:

1. Modelos de eventos aislados: son de corto plazo, diseñados para simular en eventos individuales la transformación de la lluvia en escurrimiento.

2. Modelos de procesos continuos: toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos. El objetivo de este tipo de modelos es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca.
3. Modelos de simulación mixta: intentan representar ambas escalas temporales en una forma computacionalmente económica y con un acuerdo razonable con la realidad.

Desde esta perspectiva, el modelo que se utilizará en este trabajo puede ser clasificado como un modelo matemático determinístico-conceptual, distribuido, de simulación de eventos.

3. EL MODELO TREX

TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) es un modelo bidimensional de escurrimiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes. Está basado en el modelo de cuencas CASC2D. Los procesos hidrológicos simulados son: precipitación e intercepción, infiltración y pérdidas por transmisión en el cauce, almacenamiento, flujo superficial y en canales y derretimiento de nieve ([HDR-HydroQual, 2011](#)).

El ciclo hidrológico comienza con la precipitación (pluvial y/o nival), una fracción de la misma quedará retenida en la vegetación, la precipitación excedente está disponible para infiltrar o escurrir superficialmente. En este modelo se utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces. Si la tasa de precipitación supera a la de infiltración, el agua se almacena en las depresiones del terreno hasta un determinado umbral que da comienzo al flujo superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning ([Stehli et al., 2012](#)).

Para simular el proceso hidrológico, TREX plantea una solución numérica explícita de las ecuaciones de balance de masa mediante la segmentación de la cuenca en elementos cuadrados iguales, a los cuales se le asignan los parámetros relativos a las características de infiltración del suelo y coeficientes de rugosidad.

Este modelo es de código libre, está escrito en el lenguaje de programación C y está disponible en la página web de la Universidad Estatal de Colorado, tiene una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales, pero no considera los procesos subsuperficiales y subterráneos ([Jorquera et al., 2012](#)).

4. PROCESOS HIDROLOGICOS EN TREX

Se describen someramente a continuación las ecuaciones que representan los procesos hidrológicos relevantes incluidos en el modelo TREX ([Velleux et al., 2008](#)).

4.1. Precipitación, intercepción y almacenamiento

El volumen bruto de precipitación (V_g) que llega a la superficie en función del tiempo, es igual a la intensidad de precipitación bruta (i_g) por el área de la región donde ocurre la precipitación (A_s). El volumen neto (V_n) resulta de descontarle al bruto el volumen interceptado (V_i). El balance se explicita en la ecuación 1.

$$\frac{\partial V_g}{\partial t} = i_g A_s \Rightarrow V_n = V_g - V_i \quad (1)$$

Según el volumen interceptado sea mayor o menor al volumen bruto, habrá o no volumen neto de agua sobre la superficie de la cuenca. En este cálculo no se realiza ningún descuento referido a volumen evapotranspirado, ya que es un modelo de eventos y se puede despreciar ese término.

El volumen de precipitación neta también se puede expresar como una tasa de precipitación neta (efectiva):

$$i_n = \frac{1}{A_s} \frac{\partial V_n}{\partial t} \quad (2)$$

4.2. Infiltración

Para definir la infiltración de agua en la superficie de la cuenca como así también en los cauces que la forman, el modelo TREX utiliza las relaciones de Green y Ampt (1911, citado por Chow et al. (1994)).

$$f = K_h \left(1 + \frac{\psi(1 - S_e)\theta_e}{F} \right) \quad (3)$$

donde K_h es la conductividad hidráulica, ψ es la altura de succión del frente de saturación (altura de succión capilar), S_e es el porcentaje de saturación efectiva del suelo, θ_e la porosidad efectiva del suelo, f la tasa de infiltración y F la altura de infiltración acumulada, vinculadas a través de:

$$f = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

lo cual da lugar a una relación no lineal resuelta a través de un método iterativo (Chow et al., 1994).

La aplicación del modelo de Green-Ampt, requiere la estimación de la conductividad hidráulica K_h , la porosidad η y la altura de succión del frente de mojado ψ . La variación de la altura de succión y de la conductividad hidráulica con la humedad puede expresarse en función de una saturación efectiva, S_e .

Se define como humedad residual, θ_r al contenido de humedad después de haber drenado completamente el suelo. La saturación efectiva se define entonces como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r} \quad (5)$$

donde la diferencia $\eta - \theta_r$ se conoce como porosidad efectiva θ_e .

De la ecuación 5, para la condición inicial $\theta = \theta_i = S_e\theta_e + \theta_r$ y la variación de humedad cuando pasa el frente de saturación es $\Delta\theta = \eta - \theta_i = (1 - S_e)\theta_e$.

Brooks y Corey (1964, citado por Chow et al. (1994)) dedujeron de sus estudios que

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad (6)$$

en la cual ψ_b y λ son constantes que se obtienen mediante el secado del suelo por etapas, midiendo S_e y ψ en cada una de dichas etapas.

4.3. Flujo superficial

La fracción de precipitación no retenida ni infiltrada genera un flujo superficial, tanto man-tiforme (bidimensional) como en canales (unidimensional). El flujo superficial puede ocurrir cuando la profundidad del agua en el plano terrestre supera el umbral de almacenamiento de la depresión. El flujo superficial se rige por la conservación de la masa (continuidad) y la conservación de cantidad de movimiento. Las ecuaciones de continuidad para el flujo en dos dimensiones gradualmente variado, sobre un plano rectangular en coordenadas (x , y) son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i_n - f + W = i_e \quad (7)$$

donde h es la altura de flujo superficial, W es un término fuente/sumidero (descarga/aporte unitario puntual), i_n es la intensidad de precipitación neta (obtenida a partir de 1), i_e es la intensidad de precipitación en exceso, y q_x , q_y son los caudales unitarios en la dirección x o y dados por

$$q_x = \frac{Q_x}{B_x} \quad (8)$$

$$q_y = \frac{Q_y}{B_y} \quad (9)$$

siendo Q_x , Q_y el flujo en la dirección x o y y B_x , B_y el ancho de flujo en la dirección x o y .

Suponiendo que el flujo es turbulento y la resistencia se puede describir utilizando la formulación de Manning (en unidades del SI), las relaciones de escurrimiento-profundidad son:

$$q_x = \frac{S_{fx}^{1/2} h^{5/3}}{n} \quad (10)$$

$$q_y = \frac{S_{fy}^{1/2} h^{5/3}}{n} \quad (11)$$

donde S_{fx} , S_{fy} son las pendientes de la línea de energía en las direcciones x e y , y n es el coeficiente de rugosidad de Manning. Nuevamente, las relaciones 7 a 11 dan lugar a un problema no lineal resuelto en forma iterativa.

En el flujo superficial en canales (ríos y arroyos) se aplica una formulación equivalente pero unidimensional. La ecuación de conservación de masa toma la forma:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (12)$$

donde A_c es el área de la sección transversal del flujo, Q es el caudal total y q_l es el caudal unitario lateral (que entra o sale del canal).

Para resolver las ecuaciones de flujo de canal para la continuidad y momento, la relación de Manning se puede utilizar para describir la resistencia al flujo:

$$Q = \frac{1}{n} A_c R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (13)$$

donde $R_h = \frac{A_c}{P_c}$ es el radio hidráulico, cociente entre el área transversal de flujo y el perímetro mojado P_c .

4.4. Cálculos en TREX

Para simular el conjunto de los procesos hidrológicos descritos, se deben asignar los valores para cada parámetro del modelo y deben ser resueltas las ecuaciones de balance de masa definidas en el marco del modelo determinístico-conceptual. Las ecuaciones de conservación de masa (7 y 12) son discretizadas en diferencias finitas, mientras que la integración numérica temporal se realiza con un esquema hacia adelante (Euler):

$$s|_{t+\Delta t} = s|_t + \frac{\partial s}{\partial t}|_t \Delta t \quad (14)$$

siendo $s|_{t+\Delta t}$ el valor de la variable del modelo en el tiempo $t + \Delta t$, $s|_t$ el valor de la variable del modelo en el tiempo t , $\frac{\partial s}{\partial t}|_t$ el valor de la derivada de la variable con respecto al tiempo en el tiempo t , y Δt el paso de tiempo para la integración numérica.

La solución numérica explícita se consigue mediante la segmentación de la cuenca hidrográfica entera en elementos cuadrados iguales, a los cuales se les asignan los distintos parámetros relativos del modelo. Como cada parámetro está definido, se supone que es uniforme en toda el área de la celda, este valor actual es asignado a un punto central nodal (figura 1).

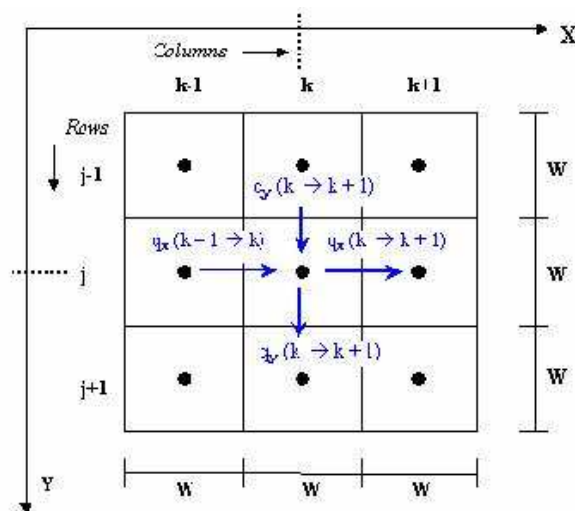


Figura 1: Discretización espacial en el modelo TREX

4.5. Datos y Parámetros a ingresar

TREX requiere un archivo de entrada principal que controla la mayoría de los aspectos de la simulación. Dentro de este archivo de entrada principal, las entradas se dividen en seis grupos de parámetros relacionados (Grupos de datos de A a F). Este archivo también especifica una serie de archivos de entrada auxiliares que se requieren para operar el modelo. Los archivos auxiliares de entrada se utilizan para definir las características específicas de la simulación como los límites de la cuenca hidrográfica, la topografía, clases de suelos y uso de la tierra, etc. La ventaja que posee TREX es que muchos de estos archivos auxiliares (como así también los archivos de resultados) pueden ser procesados y visualizados mediante un sistema de información geográfica (SIG), particularmente GRASS (Neteler y Mitasova, 2008), que tiene un nivel integración muy alto con TREX a través de sus interfaces de lectura-escritura.

5. CUENCA EN ESTUDIO

La aplicación y calibración de modelos hidrológicos continuos requiere una calidad y densidad, tanto espacial como temporal, de datos de campo. En ese sentido, la cuenca del río de La Suela reúne dichos requisitos en su carácter de haber sido una de las ocho cuencas piloto-representativas instaladas en distintas regiones como parte del Programa de Investigación sobre Cuencas Pilotos y Experimentales desarrollado en nuestro país a través de la UNESCO durante el Decenio Hidrológico Internacional (1960-1970) declarado por Naciones Unidas (Bustamante, 1978). El equipamiento instrumental y la medición sistemática de los procesos del ciclo hidrológico en estas cuencas, permitieron el desarrollo de metodologías con base científica y tecnológica en el área de la hidrología y los recursos hídricos. La alta densidad areal de su red histórica de estaciones de lluvia, de observaciones meteorológicas (temperatura, viento, humedad y otras variables) y de mediciones hidrológicas (niveles hidrométricos y caudales), hacen posible la implementación y experimentación de algoritmos que permitan simular, ya sea en forma total o parcial, los componentes y procesos del ciclo hidrológico. Los estudios específicos en aspectos climáticos, geológicos, geomorfológicos, de suelos, vegetación, infiltración, escurrimientos entre otros, brindan por su parte, antecedentes importantes para la modelación hidrológica (Weber et al., 2010).

5.1. Ubicación geográfica y aspectos fisiográficos

La cuenca del río de La Suela se encuentra ubicada totalmente en la provincia de Córdoba, al sur de la localidad de Villa Carlos Paz accediendo a ella por la Ruta Nacional 20 (Figura 2). Tiene una superficie de 131,8 Km² comprendida entre los 900 y los 2200 metros sobre el nivel del mar. La cuenca está localizada en el núcleo central de las Sierras Pampeanas, entre los 31° 40' y 31° 30' de latitud sur y los 64° 30' y 64° 45' de longitud oeste, sobre el cordón de las Cumbres de Achala y sus estribaciones orientales. Hidrográficamente el río de La Suela es tributario del Anizacate, afluente a su vez del Xanaes o Río Segundo.

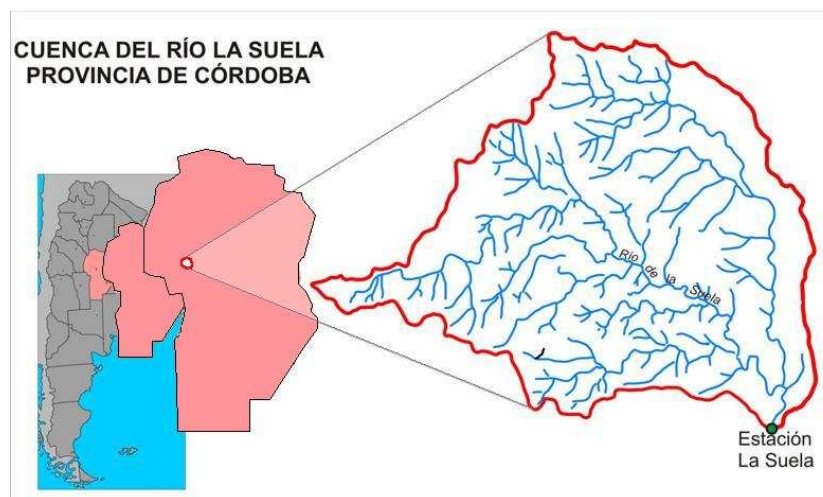


Figura 2: Ubicación geográfica cuenca del río de La Suela

5.2. Geología y geomorfología

De acuerdo a un trabajo antecedente de Barbeito y von Müller (1981), los materiales de superficie de la Cuenca, corresponden a un basamento cristalino antiguo compuesto por: un 66 %

de rocas graníticas y un 25 % de metamorfitas, correspondiendo el 9 % restante a sedimentos aluvionales modernos asentados en pequeños valles. Las fuerzas orogénicas que actuaron a lo largo de la evolución geológica de acuerdo a la rigidez de las rocas, resolvieron dos ambientes diferenciales: las cumbres propiamente dichas y sus estribaciones escalonadas. El primero, es producto de una intensa fracturación y posterior sobre elevación del basamento o zócalo que alcanzó los 2.200 m.s.n.m y el segundo, en respuesta a una tectónica menos intensa, adoptó una morfología escalonada con descenso hacia el este. Las cumbres de Achala en su conjunto, constituyen desde el punto de vista estructural, un Pilar Tectónico o "Horst", limitado por dos fallas transversales de rumbo meridional. Sobre estas, en el sector occidental de la Cuenca, comienza a organizarse el drenaje a través de un paisaje con predominio de formas abruptas, que evidencian un estado de juventud morfológica. Los interfluvios son angostos y de vertientes generalmente empinadas en donde aflora con frecuencia la roca granítica. Las pendientes medias varían desde un 30 % hasta un 50 % en los sectores de mayor intensidad tectónica (Quebradas - Abruptos de Falla) y las formas planas son escasas y limitadas casi con exclusividad a las máximas altitudes.

Hacia el este, las estribaciones de la unidad estructural adquieren una fisonomía más suavizada. El paisaje aquí se representa por la abundancia de colinas convexas con gradientes medios entre 10 % y 15 %. Los interfluvios son más amplios y de laderas menos enérgicas en donde es mayor el asentamiento de suelos, disminuyendo por ende la rocosidad. La escasez de formas accidentadas limitadas a la acción erosiva lineal de los cursos de agua o a la tectónica, evidencia una cierta madurez morfológica. Estas dos grandes áreas geomorfológicas, influyen de acuerdo a sus medios físicos en las condiciones ecológicas con implicancia en la distribución de la vegetación.

5.3. Hidrografía e hidrología

La cuenca del río de La Suela constituye desde el punto de vista hidrográfico, la naciente norte de la cuenca imbrífera del río Segundo o Xanaes con desagüe en el sistema endorreico de la Laguna de Mar Chiquita o de Ansenzuza. Dos subcuencas de carácter bien definidas que unen sus aportes a menos de 2 Km del cierre de la cuenca conforman el drenaje: la subcuenca del río de La Suela propiamente dicha que localiza sus nacientes en el Cordón de Achala a 2.200 m.s.n.m y la subcuenca del Arroyo de la Estancia, que lo hace a 1.500 m.s.n.m sobre las estribaciones de este, en la localidad de Copina.

La subcuenca La Suela (60 % del área) ubicada en el sector sudoeste de la cuenca, con nacimiento en el borde oriental de las Sierras Grandes. Su punto de mayor altitud se encuentra en las nacientes del arroyo del Carnero, uno de sus principales afluentes (Dasso, 1983). Se pueden nombrar varios arroyos perennes que aportan sus aguas a este tributario como: el arroyo del Carnero, el arroyo del Hinojo, el arroyo del Colgado, luego colecta las aguas del arroyo intermitente El Durazno y los últimos aportes los recibe del arroyo de Las Moras y el arroyo Puma Huasi. La subcuenca La Estancia es de menor altitud y respuestas más lentas (pendiente 2 %), está conformada por un arroyo de curso permanente: el arroyo San Bernardo que luego continúa como arroyo de La Estancia, y varios arroyos menores de escurrimientos intermitentes.

En la Figura 3 se muestra una imagen satelital con la delimitación de la cuenca y la red hidrográfica principal de ambas subcuencas. La longitud del río principal (Carnero – La Suela) desde sus nacientes, hasta la estación de cierre es de 28,92 Km, con una pendiente media uniforme del 4 % alcanzando una pendiente máxima en el escalón tectónico del 13 %.

Las crecidas en el río de La Suela presentan generalmente uno o más picos bien diferenciados, con tiempos de subida entre 15 y 30 minutos y de permanencia de 7 a 8 horas. El análisis

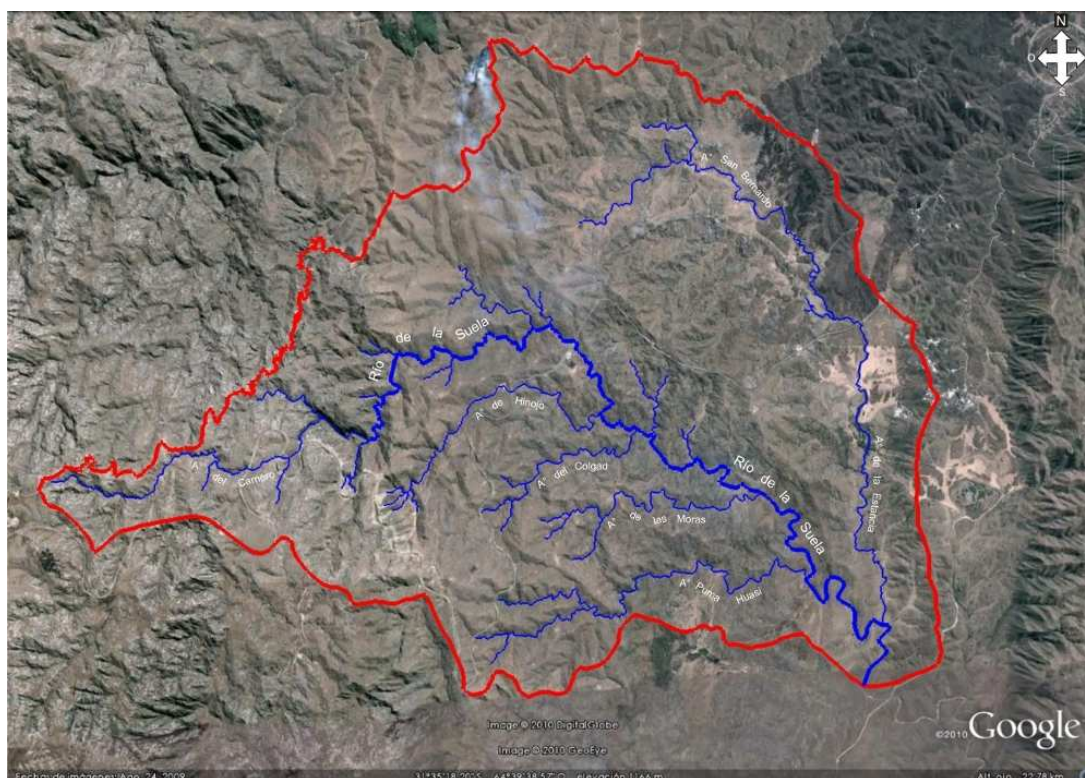


Figura 3: Imagen satelital de la cuenca del río de La Suela

de los hidrogramas evidencia el aporte de tiempos de retardo diferentes que incrementan el volumen y la permanencia de las crecidas (Caamaño y Dasso, 1990).

5.4. Tipos y uso del suelo

Se ajustan a las características de suelos azonales (litosólicos y regosólicos), cuya particularidad se traduce en la falta de horizontes definidos y a su reducido espesor. Derivan, de la alteración directa de la roca y su profundidad está supeditada a la posición topográfica que ocupen. En general, son suelos superficiales a muy superficiales, de buena permeabilidad, textura arenosa a franco arenosa y con regular cantidad de materia orgánica. Estas aptitudes permiten el paso de las raíces hasta el material originario, hecho que explica el por qué, de la presencia de ejemplares arbóreos donde hay suelos de poca profundidad (Barbeito y von Müller, 1981).

Un perfil típico con buen grado de desarrollo puede describirse con: un horizonte superficial (hasta aproximadamente 2 m) con restos orgánicos parcialmente descompuestos, uno o dos horizontes de colores oscuros de textura arenosa con abundantes raicillas en la parte superior y gravas y cantos de roca parcialmente alterada asentados sobre la roca madre granítica o basamento.

Los suelos de la cuenca del río de La Suela, ubicada íntegramente en el departamento Punilla ha sido clasificada como clase VII, correspondiente a suelos con muy graves limitaciones para el uso, resultando ineptos para cultivos. Su uso queda reducido exclusivamente para pasturas cultivadas, campos naturales de pastoreo o para bosques y refugio de la fauna.

5.5. Vegetación

Según Barbeito y von Müller (1981) la cobertura vegetal de la cuenca está caracterizada como vegetación de Las Sierras, la que se distribuye en tres pisos: monte serrano, arbustal o

romerillal y pastizales y bosquecillos de altura, cuya existencia, amplitud densidad y elevación, están en función de la altitud, latitud y orientación geográfica. La diferencia de altitud de la cuenca del río de La Suela, determinó la existencia de estos tres pisos distribuidos según dos grandes ambientes; Sub-andino: corresponde a las cumbres por encima de los 1.600 m.s.n.m y el Pedemontano por debajo de esta altitud.

En la baja cuenca, la cubierta está compuesta por elementos típicos del Monte Serrano entremezclados con ejemplares pertenecientes al Monte Xerófilo circundante, los que a medida que aumenta la altitud disminuyen para dar lugar a la flora del Monte Serrano típico que se extiende según sectores, hasta los 1.500 m.s.n.m con una textura abierta configurando manchones de grupos arbóreos (cocos – molles). Por encima de esta altitud el estrato del Monte, forma ecotonos con el piso del Romerillal y los pastos de altura, sin el predominio marcado de uno de ellos. Sobrepasando los 1.600 m.s.n.m, aparece el piso de los Pastizales y bosquecillos de altura, ya en el ambiente Sub-andino de las cumbres. En este caso los ejemplares arbóreos típicos del piso (tabaquillos), están limitados a quebradas que influyen localmente en las condiciones climáticas.

6. APLICACION

6.1. Modelado de la cuenca

La cuenca fue modelada en base al procesamiento de la información disponible a través de GRASS GIS. El mapa digital de elevación de la cuenca fue generado a partir de la información disponible públicamente de la misión del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Esta misión se llevó a cabo con el objetivo de generar datos topográficos digitales de gran parte del mundo. La resolución de las celdas de los datos fuente es de 1 segundo de arco, sobre Estados Unidos y en el resto del mundo, 3 segundos de arco, lo cual se traduce en la región de las sierras de Córdoba en un pixel de aproximadamente 90 x 90 m.

Con estos datos, y con ayuda de GRASS GIS, se delimitó la cuenca del río La Suela, obteniendo así el mapa máscara de la cuenca, el mapa digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés), como así también mapa de cauces y de segmentos de cauces. En la figura 4 se presenta el modelo digital de elevación de la cuenca del río La Suela (Stehli et al., 2012). A partir del mismo TREX permite generar la red de drenaje de la cuenca, como se muestra en la figura 5. El modelo de cuenca así obtenido quedó discretizado en 17844 celdas (pixeles) activas en la cuenca.

Cada mapa es utilizado por T-REX para realizar sus cálculos; el mapa máscara identifica las celdas activas que pertenecen a la cuenca, el DEM sirve para definir las pendientes en la cuenca, número de cauces indica los cauces y el orden de cálculo (definiendo cual se encuentra aguas abajo y cual aguas arriba), por último el mapa de número de segmentos de cauces, divide a cada cauce en segmentos de igual tamaño (en correspondencia del tamaño de la celda) para poder definir sus características específicas (coeficiente de rugosidad de Manning, sección, altura, sinuosidad, etc), luego, en un archivo auxiliar.

Otro conjunto de información requerida por TREX lo constituyen los mapas de tipo y usos de suelo (este último caracterizado por el grado de cobertura vegetal). Para la elaboración de estos mapas, se realizó la digitalización de mapas elaborados por trabajos precedentes (Font y Bustamante, 1983), sobre vegetación y erosión en cuencas de carácter torrencial. En la figura 6 se muestran los dos mapas indicados que fueron digitalizados a partir de la información original en formato analógico.

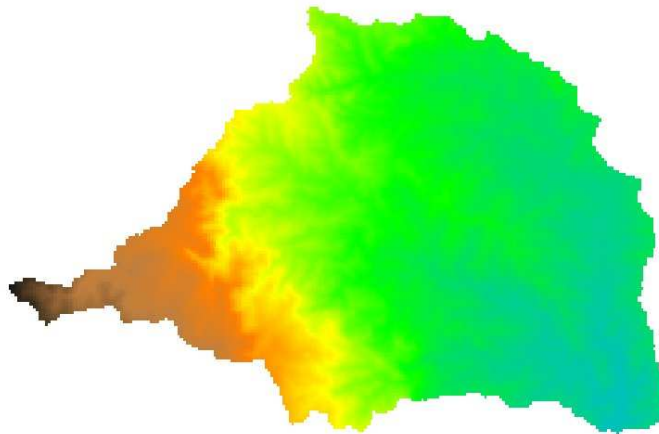


Figura 4: Modelo digital de elevación de la cuenca del río La Suela

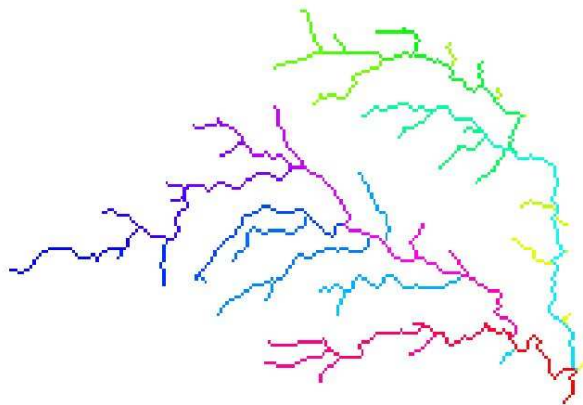


Figura 5: Red de drenaje de la cuenca del río La Suela generada a partir del DEM con GRASS GIS

6.2. Simulación del movimiento de la tormenta

Con el objetivo de describir de un modo más detallado el proceso de transformación lluvia-caudal en la cuenca del río La Suela, ante tormentas variables tanto espacial como temporalmente, se realizaron simulaciones ante eventos hipotéticos donde se presentaron como variables la intensidad de la lluvia, y la dirección y velocidad del desplazamiento de la tormenta.

Se asume que las tormentas bajo este análisis responderán a una génesis eminentemente convectiva, con fuertes núcleos de convección concentrados en áreas limitadas de la cuenca, que son propias de las tormentas de verano en la zona serrana de Córdoba. Quedan fuera de este análisis las tormentas de tipo frontal, mucho más homogéneas en el espacio y tiempo, para las cuales la modelación agregada da resultados suficientemente precisos.

Características de las simulaciones:

1. Cuenca: río La Suela, provincia de Córdoba, Argentina.
2. Parámetros del tipo y uso de suelos: los calibrados para la tormenta del 27 de Enero 1977 para la cuenca La Suela (Stehli et al., 2012).
3. Forma de la tormenta: Se utilizó una distribución espacial de la tormenta de forma elíptica, de acuerdo a la metodología del NOAA (Hansen et al., 1982).

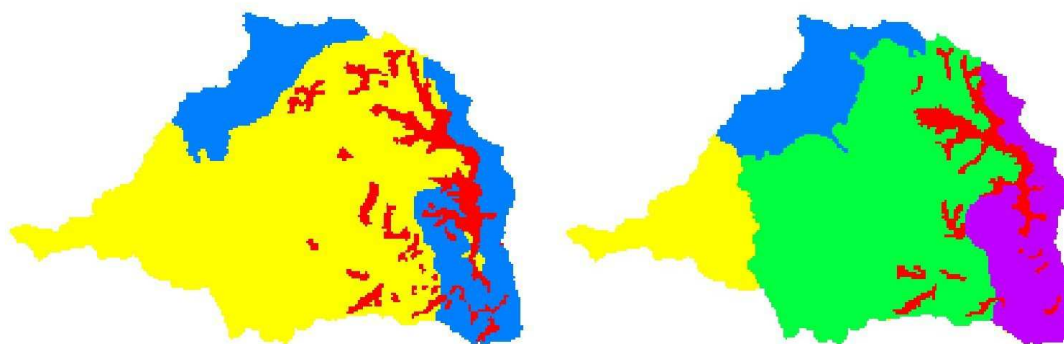


Figura 6: Tipos (izquierda) y usos (derecha) de suelo de la cuenca del río La Suela

4. Movimiento de la tormenta: Se consideraron dos variables:

- a) Velocidad: eventos donde la tormenta se mueve a una velocidad de 10 a 60 km/h
- b) Dirección: Se tuvieron en cuenta 8 direcciones de la tormenta, todas pasando por el centroide de la cuenca:
 - 1) Norte a Sur (N)
 - 2) Noreste a Suroeste (NE).
 - 3) Este a Oeste (E)
 - 4) Sureste a Noroeste (SE).
 - 5) Sur a Norte (S).
 - 6) Suroeste a Noreste (SW).
 - 7) Oeste a Este (W).
 - 8) Noroeste a Sureste (NW).

6.3. Forma de la tormenta

Si bien estrictamente hablando el procedimiento descrito a continuación ha sido desarrollado por Hansen et al. (1982) para la PMP (precipitación máxima probable), a los fines del desarrollo del presente trabajo se ha adoptado esta metodología para representar los eventos hipotéticos bajo análisis, que responderían a características de lluvias de diseño.

La definición del campo de precipitación instantáneo requiere caracterizar los siguientes aspectos de la tormenta:

1. Lámina de precipitación
2. Relación entre lámina precipitada, área y duración.
3. Definición del patrón típico de tormenta.
4. Factor de ajuste por orientación.
5. Área de la tormenta crítica.
6. Factor de área de isohietas.

Para la definición de la lámina precipitada, se requiere una relación entre intensidad, duración y probabilidad de excedencia (denominada relación idT) que caracteriza a las tormentas de diseño de un sitio determinado. Para el ámbito de la provincia de Córdoba, existe un procedimiento sistematizado de base estadística para la definición de la relación idT, denominado modelo DIT (Caamaño Nelli y Dasso, 2003). Este modelo define una relación explícita entre la intensidad de lluvia, su duración y su periodo de retorno de la forma:

$$\ln i_{d,T} = A \cdot \Phi_y - B \cdot \delta_y + C \quad (15)$$

donde $i_{d,T}$ es la intensidad de lluvia (función de la duración d y del periodo de retorno T) A , B y C son 3 parámetros del modelo, Φ_y es el factor de frecuencia asociado al periodo de retorno T , y δ_y es un factor de duración que puede estimarse como

$$\delta_y = (\ln d)^q \quad (16)$$

donde q es el cuarto parámetro del modelo.

Se consideraron duraciones comprendidas entre 5 y 360 minutos, y periodos de retorno comprendidos entre 5 y 100 años, obteniéndose las relaciones idT representadas en la figura 7; seleccionándose finalmente como valores a considerar en el presente estudio los correspondientes a una duración de 6 horas y una recurrencia de 100 años.

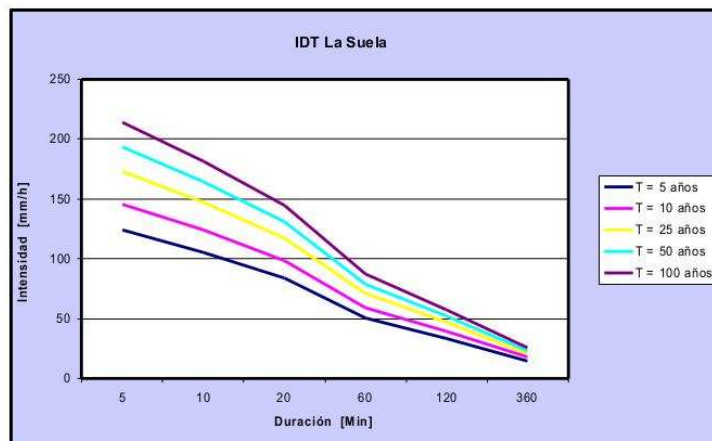


Figura 7: Relaciones idT para la cuenca del río La Suela obtenidas a partir del modelo DIT

Para la definición de la relación lámina-área-duración se adoptó el denominado modelo CODA (Caamaño Nelli y Dasso, 2003). Este modelo define una relación adimensional (llamado coeficiente de decaimiento areal CDA) entre la lámina precipitada en la denominada estación núcleo y la lámina media precipitada en un área determinada A (km^2). Esta relación empírica, establecida para la cuenca del río San Antonio (vecina de la cuenca del río La Suela), viene dada por la expresión:

$$CDA = 25^k \cdot A^{-k} \quad (17)$$

donde el exponente k depende de la duración de la tormenta:

$$k = 2,0759d^{-0,5073} \quad (18)$$

La figura 8 muestra la representación gráfica de las ecuaciones 17 y 18 para distintas áreas y duraciones típicas de las tormentas en la zona. La figura 9 muestra la relación profundidad(lámina)-área-duración obtenida para la cuenca del río La Suela, al combinar el modelo CoDA (ecuación 17) con el modelo DIT (ecuación 15).

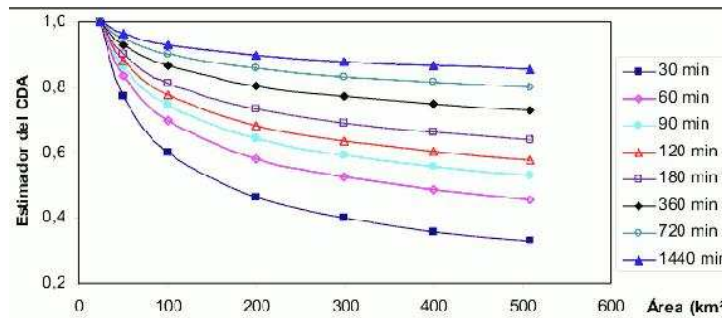


Figura 8: Coeficiente de decaimiento areal para la cuenca del río San Antonio (Caamaño Nelli y Dasso, 2003)

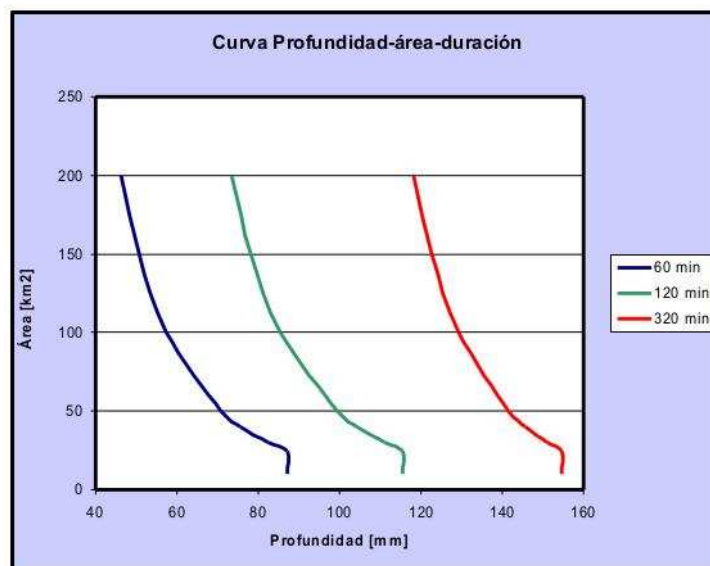


Figura 9: Curva profundidad-área-duración para la cuenca del río La Suela

El patrón típico de tormenta, tal como se mencionó anteriormente, se asume con una distribución elíptica en planta, discretizado originalmente en 14 niveles (denominados de A a N), cada uno de los cuales encierra un área específica. Las relaciones de las longitudes de los ejes mayor y menor de las elipses es 2,5 a 1. Si a y b son las longitudes de los semiejes mayor y menor, se tendrá que el área de una determinada elipse vendrá dada por:

$$A = \pi ab \tag{19}$$

y por tanto,

$$b = \sqrt{\frac{A}{2,5\pi}} \tag{20}$$

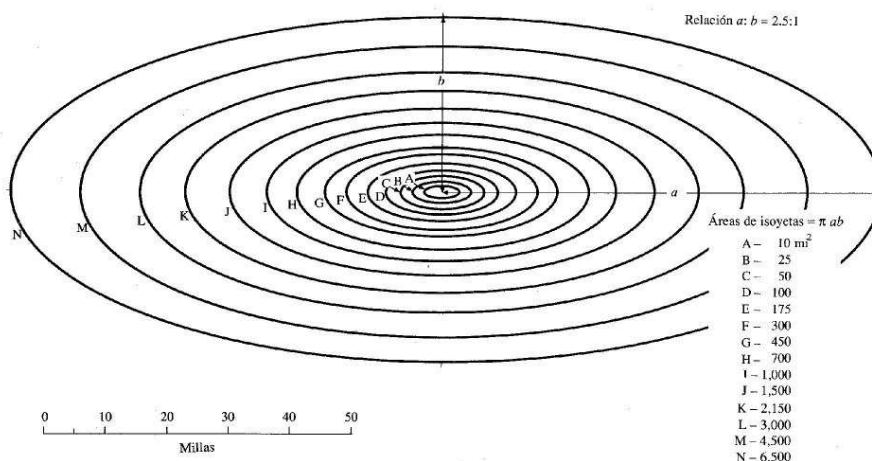


Figura 10: Patrón típico de tormenta (Hansen et al., 1982)

La figura 10 muestra el aspecto de un patrón típico de tormenta obtenido con esta metodología.

En el caso de la cuenca del río La Suela, se consideraron 4 curvas isohietas (5 sectores), ya que a partir de la quinta isohieta las áreas incluidas exceden en mucho el tamaño de la cuenca; manteniendo las proporciones entre semiejes mayor y menor. La lámina precipitada se afectó por el factor de corrección según el área comprendida entre isohietas (Hansen et al., 1982) obteniéndose una distribución espacial de la intensidad de lluvia indicada en la tabla 1 y representada en la figura 11 (en ese caso con la tormenta centrada en el baricentro de la cuenca y orientada en dirección Este-Oeste).

| Sector | Area km ² | Intensidad (mm/h) |
|--------|----------------------|-------------------|
| A | 25.9 | 24.3 |
| B | 38.9 | 17.7 |
| C | 41.7 | 13.3 |
| D | 32.3 | 10.4 |
| E | 5.7 | 8.8 |

Tabla 1: Distribución espacial de la intensidad de lluvia - patrón elíptico

6.4. Movimiento de la tormenta

Para la simulación del desplazamiento de la tormenta a lo largo de la cuenca, se asumieron las siguientes hipótesis:

1. La velocidad y dirección del viento es constante mientras la tormenta transita a lo largo de la cuenca
2. La forma de la tormenta permanece invariante en su tránsito a través de la cuenca
3. Las intensidades asociadas a cada sector elíptico se mantienen constantes durante el mismo recorrido
4. La trayectoria del núcleo de las tormentas simuladas pasa por el baricentro de la cuenca.

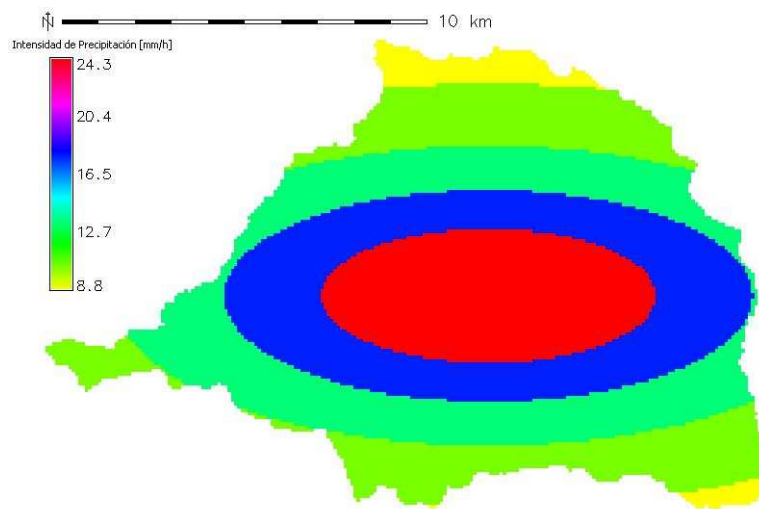


Figura 11: Distribución espacial de la intensidad de lluvia asumida para la cuenca del río La Suela - tormenta con orientación E-W

Claramente las tres primeras hipótesis sólo pueden justificarse ante una cuenca de extensión relativamente limitada como lo es la cuenca del río La Suela, mientras que la última es puramente convencional, con el objeto de maximizar la respuesta hidrológica del sistema en estudio.

Se consideraron 6 velocidades del viento de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 km/h, y 8 direcciones del viento N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, lo que dio lugar a 48 tormentas simuladas.

La intersección de las 8 direcciones de viento antes indicadas, pasantes por el baricentro de la cuenca, con el límite de la misma, definieron 8 puntos de ingreso de la tormenta a la cuenca a partir de los cuales se fijó el tiempo inicial de la simulación (figura 12).

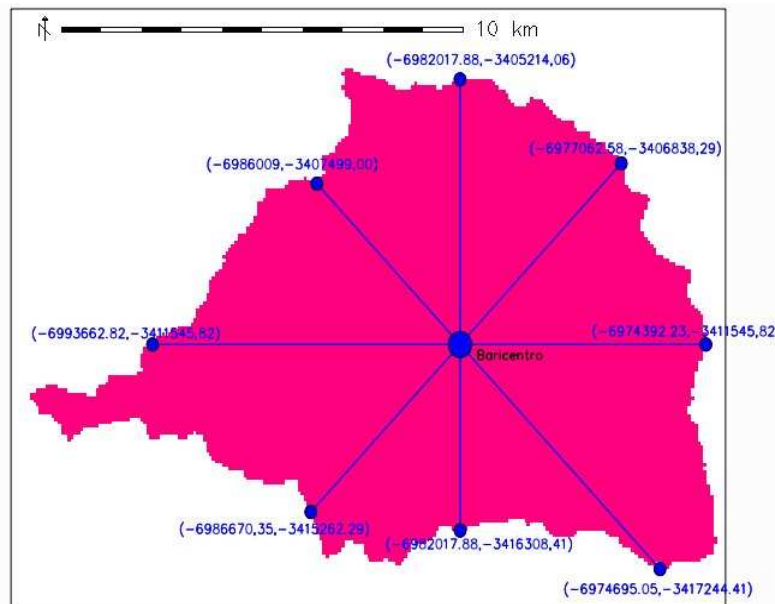


Figura 12: Trayectorias de los núcleos de tormenta simuladas - cuenca del río La Suela

Para el ingreso de la tormenta en TREX, se aprovechó la interfaz de lectura de datos de radar, que responden a un modelo raster de información adecuado para su manipulación en GRASS GIS. Para ello, TREX requiere (para cada tormenta simulada) un mapa raster de precipita-

ción (intensidad asociada a cada pixel) para cada instante de tiempo, de acuerdo a un intervalo temporal prefijado (de 0,1 h), limitado por condiciones de estabilidad numérica en la solución explícita. Cada mapa puede interpretarse como un fotograma del movimiento de la tormenta.

La generación de este volumen de información se automatizó a través de un código *ad-hoc* escrito en GNU Octave (Eaton et al., 2007), cuyo algoritmo recorre los siguientes pasos:

1. Se posiciona el patrón elíptico de la tormenta tangente a uno de los 8 puntos de ingreso definidos en la figura 12.
2. En función de la velocidad del viento y del intervalo de tiempo elegido se define el tiempo total de tránsito de la tormenta y el número de intervalos, lo que a su vez determina en número total de mapas a generar.
3. A partir de la ecuación de la elipse $\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1$ se asigna a cada pixel la intensidad correspondiente de acuerdo a los valores de la Tabla 1.
4. Para el caso de las direcciones de viento NW, SE, SW, NE, previamente deberá realizarse una rotación de los ejes de referencia según la conocida transformación de coordenadas:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (21)$$

5. El proceso antes indicado se anida en un triple bucle que recorre cada paso de tiempo para cada una de las distintas velocidades y orientaciones del viento.

Se realizaron 48 corridas en TREX que simulaban eventos de duraciones comprendidas entre 8 y 30 horas, lo que se tradujo en tiempos de máquina comprendidos entre 15 y 45 minutos, para un procesador Intel Core Solo Processor T1300 de 1.66 GHz, con 1016 MB de RAM.

7. RESULTADOS

En las figuras 13 a 18 se muestran los hidrogramas (caudales de descarga de la cuenca en función del tiempo) para cada velocidad de desplazamiento de la tormenta, y para las distintas orientaciones de su trayectoria. Puede observarse que para bajas velocidades, los hidrogramas obtenidos responden a una forma típica con un único pico, mientras que a medida que se incrementa la velocidad se presentan, para ciertas direcciones de la tormenta, dos picos claros en el hidrograma.

Siendo una de las variables de mayor interés desde un punto de vista ingenieril, la figura 19 muestra la magnitud del caudal pico en función de la orientación de la tormenta y de la magnitud de la velocidad. Salvando las diferencias de escala, puede apreciarse que en todos los casos las tormentas que se desplazan en las direcciones EW y WE provocan los mayores caudales pico, mientras que vientos S o SE generan los menores caudales pico. Los valores numéricos de dichos caudales pueden observarse en la tabla 2. Además se aprecia que a medida que se incrementa la velocidad de desplazamiento, es más acuciada la diferencia entre los caudales pico según la orientación (ver figuras 20 y 22). Con fines comparativos, en la figura 21 se muestra una rosa de los vientos frecuencial clasificada según velocidades, en base a la información meteorológica disponible en la estación La Suela (CRSA-INA).

Finalmente se presenta en la figura 22 la diferencia máxima (porcentual), para cada valor de velocidad del viento, entre las magnitudes de los caudales pico erogados por la cuenca, junto con esas mismas diferencias para la lámina total de lluvia promedio en la cuenca.

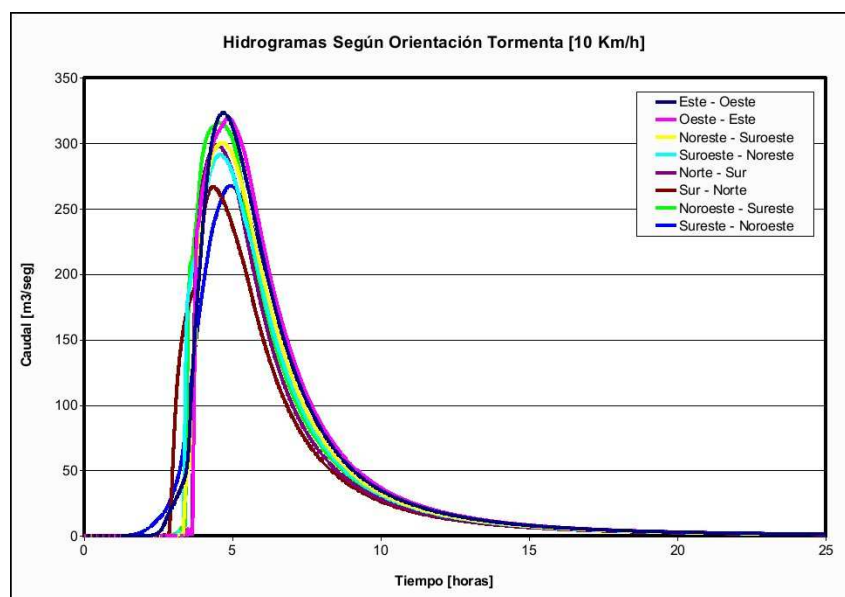


Figura 13: Hidrogramas de descarga según dirección de desplazamiento de la tormenta - cuenca del río La Suela - velocidad 10 km/h

| | 10 km/h | 20 km/h | 30 km/h | 40 km/h | 50 km/h | 60 km/h |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| N | 298.1 | 122.8 | 51.4 | 23.9 | 12.0 | 5.8 |
| NW | 315.8 | 120.0 | 51.4 | 24.7 | 12.6 | 6.9 |
| W | 319.2 | 148.5 | 70.4 | 36.2 | 19.7 | 11.2 |
| SW | 291.2 | 126.2 | 57.1 | 28.0 | 14.0 | 7.0 |
| S | 267.1 | 107.2 | 47.2 | 22.6 | 11.4 | 5.3 |
| SE | 67.7 | 104.0 | 45.0 | 22.9 | 12.0 | 6.4 |
| E | 323.5 | 141.1 | 68.6 | 35.9 | 19.6 | 11.0 |
| NE | 300.4 | 127.3 | 55.7 | 27.1 | 13.5 | 6.6 |

Tabla 2: Caudales pico (m^3/s) según dirección e intensidad del viento

8. CONCLUSIONES

Se ha podido implementar un modelo hidrológico distribuido de eventos en la cuenca del río La Suela (provincia de Córdoba) y a partir de parámetros calibrados (en base a tormentas históricas) e hipótesis razonables, simular el efecto que tiene en la respuesta hidrológica de la cuenca el desplazamiento de una tormenta sobre ella; este efecto intuitivo no es directamente analizable por los modelos hidrológicos agregados de amplia difusión en la Ingeniería Hidrológica.

El modelo TREX ha mostrado una gran versatilidad en la simulación y análisis de eventos hidrológicos en conjunto con el sistema de información geográfica GRASS.

La forma y características del hidrograma de descarga varían sensiblemente en función tanto de la velocidad del viento como de la orientación del mismo (figuras 13 a 18). Pueden presentarse hidrogramas con uno o dos picos según la combinación de las variables mencionadas. Incluso el tiempo de ocurrencia del pico (tiempo de llegada de la crecida máxima) puede variar entre 1 y 2 horas, para una misma dirección del viento, de acuerdo a la orientación del mismo.

La magnitud del caudal pico erogado disminuye, para cada orientación del viento, a medida que aumenta la velocidad del mismo, como era de esperar (figura 20).

Para una misma velocidad de desplazamiento de la tormenta (asumida igual a la velocidad

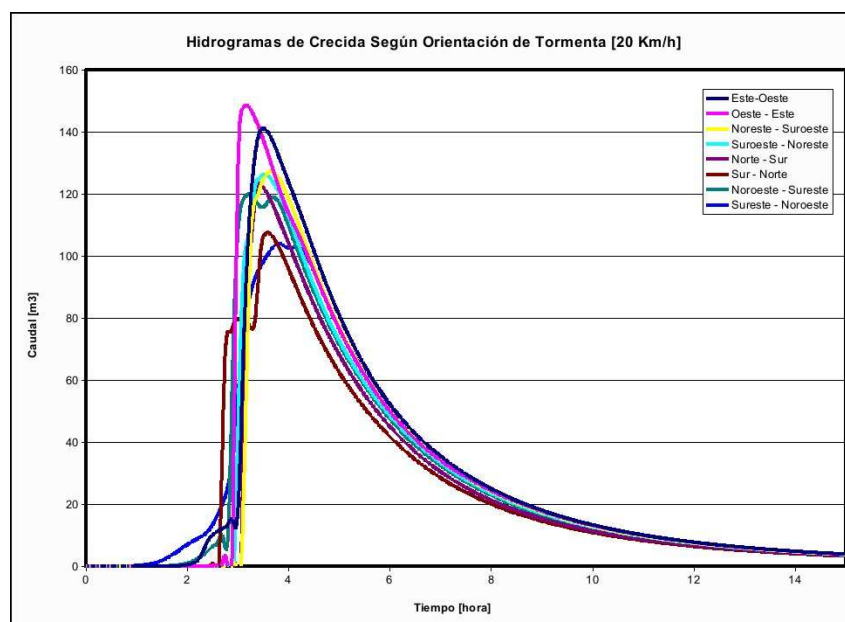


Figura 14: Hidrogramas de descarga según dirección de desplazamiento de la tormenta - cuenca del río La Suela - velocidad 20 km/h

del viento) se observa que la magnitud del caudal pico es máxima para los vientos de dirección E o W, y mínima para los de dirección S y SE (figuras 19). Las diferencias porcentuales entre estos máximos y mínimos varían entre un 17 % y un 51 %, aumentando a medida que se incrementa la velocidad del viento. Sin embargo, las diferencias porcentuales máximas entre láminas totales precipitadas en la cuenca, se mantienen acotadas alrededor del 15 %, independientemente de la velocidad del viento (figura 22). Esto muestra que para velocidades bajas la diferencia en la respuesta puede ser casi totalmente explicada por la variación en la lámina precipitada, tal como lo justifican los modelos agregados (como el hidrograma unitario), mientras que al aumentar la velocidad crece cada vez más la componente en esa diferencia que no se puede explicar sólo por la variación de la lámina llovida, sino a través del efecto de la geomorfología de la cuenca, detectada sólo por los modelos distribuidos (TRES en este caso). Por otro lado, en la figura 21 puede observarse que los vientos provenientes del E o W (y particularmente para este último) son de baja frecuencia en todas las velocidades, por lo que es de esperar que estos hidrogramas extremos tengan una baja probabilidad de ocurrencia asociada.

El modelo TRES ha mostrado entonces la capacidad de explicar, a través de la modelación numérico-matemática, fenómenos que escapan al análisis habitual de la práctica ingenieril y que pueden justificar, al menos en parte, las incertidumbres asociadas a la estimación de caudales erogados en cuencas superficiales, particularmente en cuencas de la región semiárida central del país.

9. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo recibido a través del subsidio al Proyecto de I+D Consolidado 25/E157, al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la provincia de Córdoba y al Centro de la Región Semiárida dependiente del Instituto Nacional del Agua (INA – CIRSA) por la información brindada.

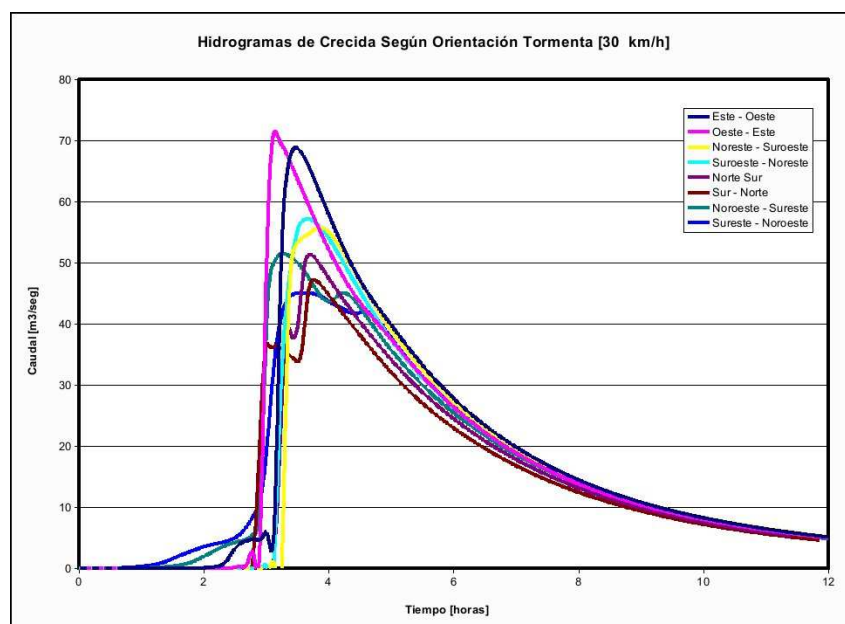


Figura 15: Hidrogramas de descarga según dirección de desplazamiento de la tormenta - cuenca del río La Suela - velocidad 30 km/h

REFERENCIAS

- Barbeito O.L. y von Müller N.B. Estudios de erosión cuenca experimental del río de la suela – reconocimiento y mapeo de la cubierta vegetal. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1981.
- Beven K.J. *Rainfall-Runoff modelling. The Primer*. John Wiley & Sons, 2001.
- Bustamante E. Cuencas piloto representativas y experimentales – programa de investigación en argentina. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1978.
- Caamaño G. y Dasso C. Relaciones paramétricas en el modelo exponencial infiltración - percolación generalizado. incidencia de la distribución espacial de la lluvia. In *Actas del XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, volumen 2, páginas 627–638. IAHR, Montevideo, Uruguay, 1990.
- Caamaño G. y Zamanillo E. Desarrollo de modelos hidrológicos de simulación para planeamiento y proyecto. Informe Técnico, CONICOR, 1991.
- Caamaño Nelli G. y Dasso C.M. *Lluvias de diseño*. Universitat, Córdoba, 2003.
- Chow V.T., Maidment R., y Mays L. *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill, 1994.
- Dasso C.M. Cuenca piloto experimental del río de la suela: caracterización geométrica y topológica de su sistema de drenaje. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1983.
- Eaton J.W., Bateman D., y Hauberg S. *GNU Octave: a high-level interactive language for numerical computations*. Free Software Foundation, www.octave.org, 2007.
- Font P.M. y Bustamante E. El comportamiento del suelo frente a la erosión, valoración de los distintos índices de erosión en cuencas de carácter torrencial. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1983.
- Hansen E.M., Schreiner L.C., y Miller J.F. Application of probable maximum precipitation estimates - united states east of the 105 th meridian. Informe Técnico, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington D.C., 1982.
- HDR-HydroQual I. *TREX Watershed Modeling Framework User's Manual: Model Theory and Description*. Colorado State University, Bureau of Reclamation, 2011.
- Jorquera E., Weber J.F., y Reyna S.M. Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica

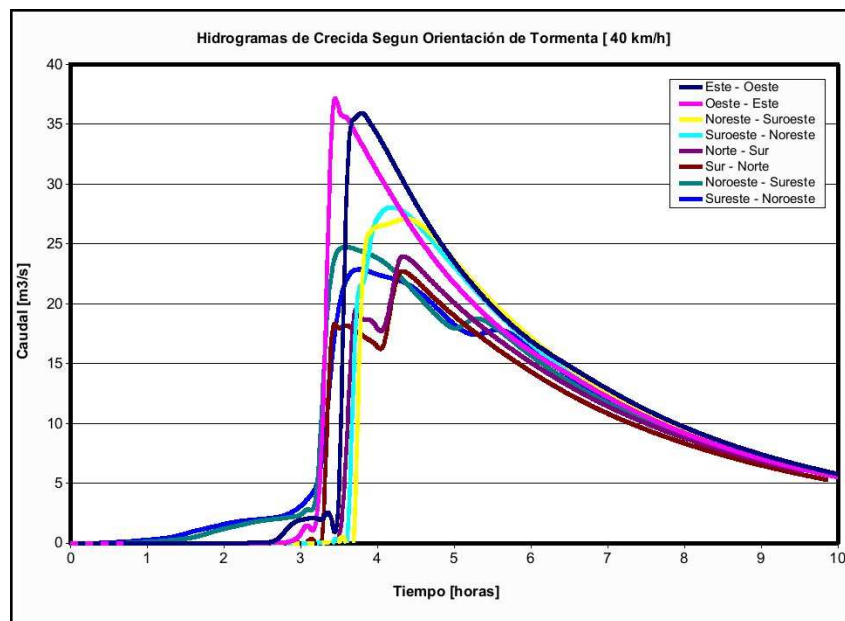


Figura 16: Hidrogramas de descarga según dirección de desplazamiento de la tormenta - cuenca del río La Suela - velocidad 40 km/h

distribuida e integrada. In *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos*. Ezeiza, Bs. As., 2012.

Neteler M. y Mitsova H. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, volumen 773 de *The International Series in Engineering and Computer Science*. Springer, New York, 2 edición, 2008.

Ponce V.M. *Engineering Hydrology. Principles and practices*. Prentice Hall, 1994.

Rodríguez M.I., Cossavella A., Bazán R., Corral M., Oviedo S., Rodríguez A., Bustamante M.A., Angelaccio C., López F., Busso F., y Bonfanti E. Efecto de los incendios en la calidad del agua de los embalses san Roque y los molinos, Córdoba. In *Trabajos del XX Congreso Nacional del Agua*. Mendoza, Argentina, 2005.

Singh P.V. *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, 1996.

Stehli P.T., Weber J.F., y Jorquera E. Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos. In *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos*. Ezeiza, Bs. As., 2012.

Velleux M., England J., y Julien P. Trex: Spatially distributed model to assess watershed contaminant transport and fate. *Science of the Total Environment*, 404(1):113–128, 2008.

Vieux B.E. *Distributed hydrologic modeling using GIS*, volumen 48. Water Science and Technology Library, 2004.

Weber J.F., Dasso C.M., y Jorquera E. Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional, Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 29:4013–4037, 2010.

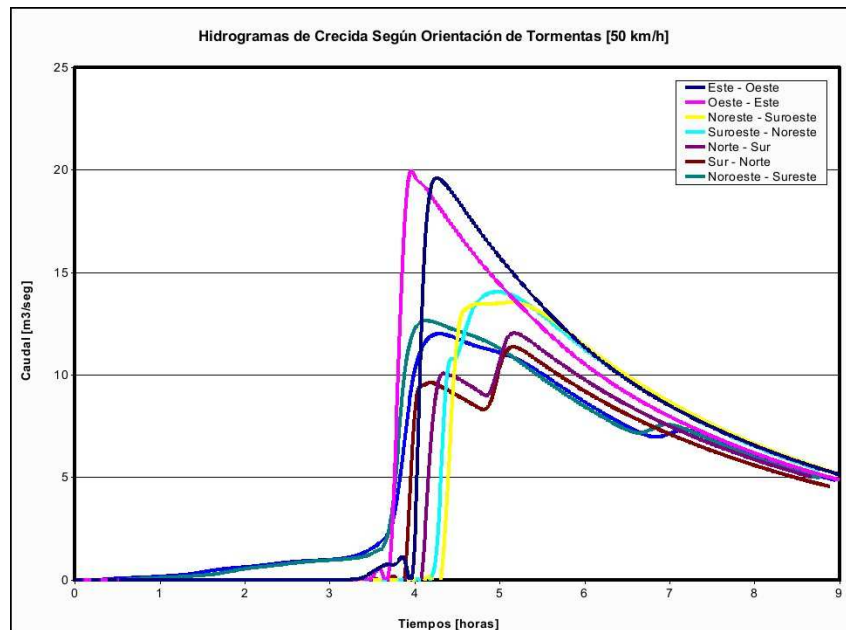


Figura 17: Hidrogramas de descarga según dirección de desplazamiento de la tormenta - cuenca del río La Suela - velocidad 50 km/h

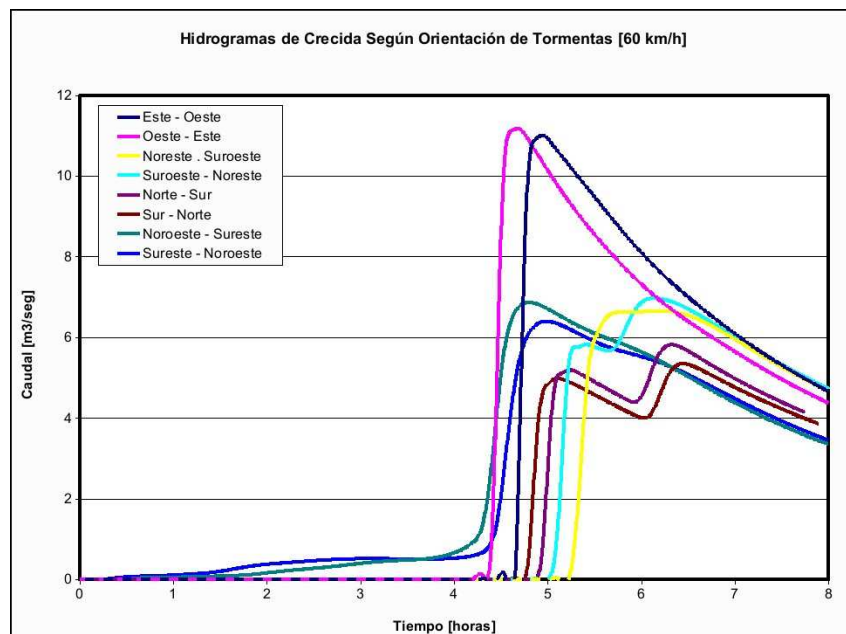


Figura 18: Hidrogramas de descarga según dirección de desplazamiento de la tormenta - cuenca del río La Suela - velocidad 60 km/h

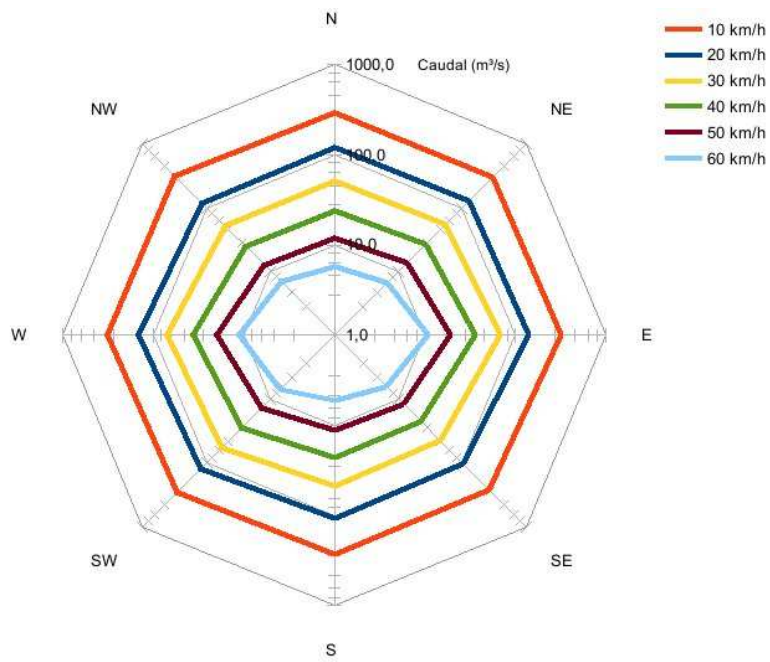


Figura 19: caudales pico según velocidad y dirección del viento - cuenca del río La Suela - escala logarítmica

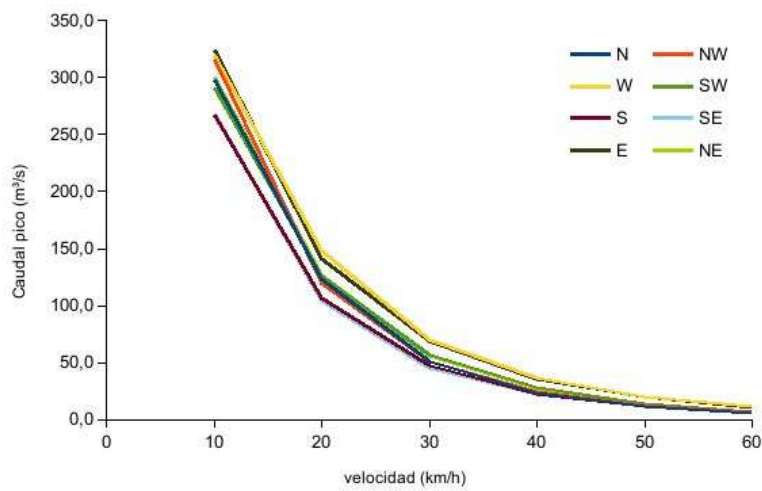


Figura 20: caudales pico según velocidad y dirección del viento - cuenca del río La Suela

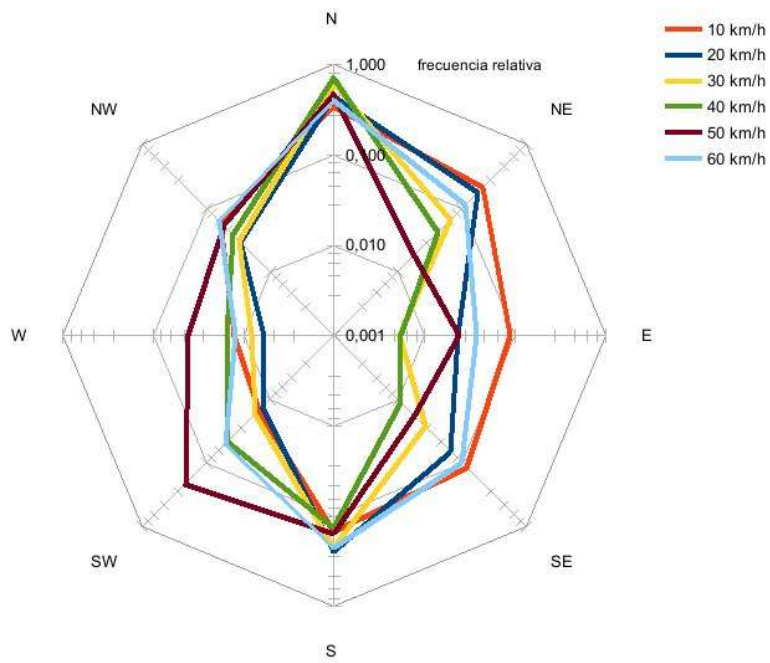


Figura 21: Rosa de los vientos frecuencial - estación La Suela

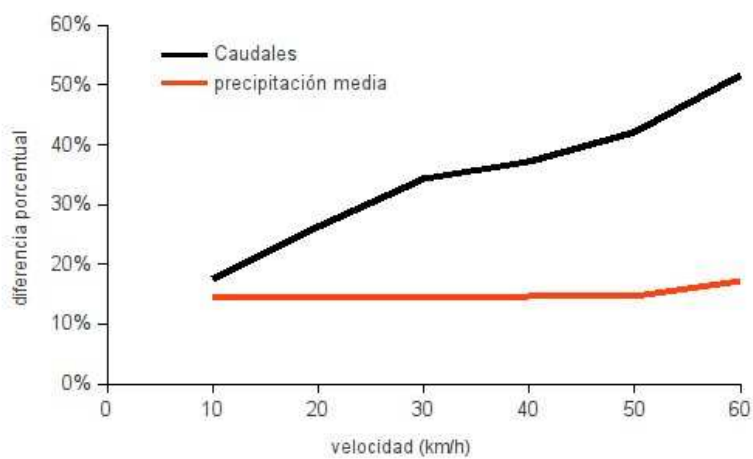


Figura 22: Diferencias porcentuales máximas entre caudales pico y lámina total precipitada según orientación en función de la velocidad