



TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Para optar al Grado Académico de
Especialista en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Efectos hidrológicos de los incendios en la cuenca del río Dolores-San Marcos (Córdoba, Argentina)

Sánchez Sofía

Directora: Ing. Agr. (MSc.) Graciela Verzino

Córdoba, 2022



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	7
2. Caracterización del área de estudio.....	9
2.1. Ubicación.....	9
2.2. Geología y geomorfología.....	10
2.3. Características climáticas generales	13
2.4. Características edáficas.....	13
2.5. Hidrología e Hidrogeología	13
2.6. Vegetación	16
3. Caracterización sociocultural-territorial	18
3.1. La región de Punilla	18
3.2. Marco Legal e Institucional	19
Leyes nacionales	19
Leyes provinciales.....	20
3.3. Instituciones y actores en la cuenca	20
4. Diagnóstico.....	21
4.1. Análisis de cobertura y uso del suelo	21
4.2. Problemáticas socio-ambientales	22
4.2.1. Incendios forestales	22
4.2.2. Erosión hídrica	24
4.2.3. Escasez de agua potable.....	25
4.2.4. Residuos sólidos urbanos	26
4.3. Áreas de Importancia para la conservación.....	26
4.3.1. Reservas Naturales.....	26
4.3.2. Sitios Arqueológicos.....	26
4.4. Árbol de problemas	27
5. Estimación del impacto de los incendios sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Dolores	29
5.1. Fundamento teórico	29
5.1.1. Modelos Hidrológicos.....	29
Modelo numérico de simulación hidrológica: HEC-HMS	30
El método del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS).....	30
5.2. Materiales y Métodos	32
5.2.1. Área de estudio	32
5.2.2. Modelo de la cuenca y delimitación de las subcuencas	34
5.2.3. Factores hidrográficos.....	35
5.2.4. Factores climáticos.....	38
5.2.5. Tránsito de cauces	41
5.2.6. Número de Curva (NC)	42

Tipo de cobertura	42
Características del suelo.....	43
Humedad antecedente	44
Mapa de Pendientes	45
Mapa de Áreas quemadas	46
5.3. Resultados	46
5.3.1. Determinación del Número de Curva.....	47
Situación pre-fuego	48
Situación post-fuego	48
5.3.2. Estimación del escurrimiento	49
5.4. Conclusiones y alcances del modelo	52
6. Propuesta de manejo	54
6.1. Restauración en zonas incendiadas	54
Restauración en la cuenca del río Dolores	56
6.2. Prevención y control de incendios	57
7. Consideraciones finales	60
8. Referencias.....	61
9. Anexos.....	68
9.1. Anexo 1. Unidades hidrogeológicas de la provincia de Córdoba	68
9.2. Anexo 2. Foto del basural a cielo abierto de Capilla del Monte.....	69
9.3. Anexo 3. Asentamientos Originarios y Sitios Arqueológicos del departamento Punilla	70
9.4. Anexo 4. Fotos tomadas en diciembre de 2020 en el área de estudio.	71
9.5. Anexo 5. Número de Curva del SCS	72

Índice de figuras

Figura 1.	Ubicación de la cuenca Cruz del Eje y cuenca del río Dolores-San Marcos.....	9
Figura 2.	Geomorfología y curvas de nivel de la cuenca del río Dolores-San Marcos.....	11
Figura 3.	Visión panorámica de los valles y localidades que conforman el área de estudio.....	12
Figura 4.	Hidrología de la cuenca del río Dolores-San Marcos: Red de drenaje y subcuencas delimitadas.....	15
Figura 5.	Perfil de la distribución altitudinal de la vegetación nativa en las Sierras Chicas.	17
Figura 6.	Mapa de coberturas vegetales y usos del suelo de la cuenca del río Dolores-San Marcos. 22	
Figura 7.	Mapa de frecuencia de incendios para el período 2001-2020 en la cuenca del río Dolores-San Marcos.....	23
Figura 8.	Área Quemada durante el mes de agosto del año 2020.	24
Figura 9.	Signos de pérdida de suelo provocado por la erosión tras los incendios.....	25
Figura 10.	Árbol de problemas elaborado para la cuenca del río Dolores-San Marcos.	28
Figura 11.	Representación gráfica de los NC.	31
Figura 12.	Ubicación de la cuenca y subcuencas del río Dolores	33
Figura 13.	Elevaciones de la cuenca del río Dolores.....	34
Figura 14.	Representación esquemática del modelo de la cuenca del río Dolores.....	35
Figura 15.	Curva I-D para una lluvia con tiempo de retorno de 10 años para el área de estudio.	38
Figura 16.	Patrón adimensional de distribución temporal de tormentas para la zona centro de la provincia de Córdoba.....	39
Figura 17.	Hietogramas de diseño de las subcuencas que conforman el área de estudio.	41
Figura 18.	Mapa de coberturas y uso del suelo para la cuenca del río Dolores y sus respectivas subcuencas.	43
Figura 19.	Tipo de grupo hidrológico de suelo (GHS) de la cuenca del río Dolores.....	44
Figura 20.	Mapa de pendientes de la cuenca del río Dolores.....	45
Figura 21.	Mapa de cobertura quemada en los incendios de 2020 en la cuenca del río Dolores.....	46
Figura 22.	Mapa del Número de curva resultante a partir de metodología de números primos mediante SIG.	48
Figura 23.	Hidrograma de la cuenca del río Dolores para la situación pre fuego.....	50
Figura 24.	Tabla resultante para la situación pre fuego (Run_sin fuego)	51
Figura 25.	Hidrograma de la cuenca del río Dolores para la situación post fuego.	51
Figura 26.	Tabla resultante para la situación post fuego (Run_post fuego).	52

Índice de Tablas

Tabla 1.	Factores morfológicos, hidrográficos y climáticos para las subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Dolores.	37
Tabla 2.	Coeficientes de Evans	38
Tabla 3.	Distribución temporal de la tormenta diseño aplicada a la lámina total de cada subcuenca	40
Tabla 4.	Asignación y cálculo de valores de Número de Curva.	47
Tabla 5.	Determinación del Número de Curva y superficie quemada para las subcuencas que conforman la cuenca del Río Dolores.	49
Tabla 6.	Caudales y lámina escurrida resultados del modelo hidrológico HEC-HMS 3.3	50

Resumen

El método hidrológico del Número de Curva (NC) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (NRCS) permite obtener la escorrentía superficial acumulada (o lluvia neta acumulada) desde el comienzo del aguacero hasta un instante dado. El NC puede estimarse a partir de información espacial sobre el suelo y las coberturas del terreno. En este trabajo se estudió una cuenca serrana y semi-urbana del departamento Punilla, provincia de Córdoba, afectada por incendios. La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) fueron utilizados para diagnosticar el estado de la cuenca y estimar el NC previo y posterior al fuego. Se utilizó información actualizada y de libre difusión de IDECOR y se procesaron imágenes MODIS para determinar el área quemada. Los incendios ocurridos en 2020 sobre la cuenca del río Dolores afectaron 2836 ha de Bosque Nativo y el NC de toda la cuenca se incrementó 2.5 puntos por encima del valor original (situación pre-fuego). Después de los incendios, el caudal pico de escorrentía en el punto de salida de la cuenca se incrementó en un 50%, mientras que el tiempo al pico en los puntos de control se adelantó entre 5 y 15 minutos. Bajo estas condiciones, se verían favorecidos los procesos erosivos e incluso inundaciones, contribuyendo a la degradación de las cuencas afectadas.

1. Introducción

Los incendios forestales provocan cambios en la cobertura del suelo que pueden tener un efecto marcado en la respuesta hidrológica de la cuenca y los riesgos hidrológicos asociados. Los cambios en las coberturas del suelo, como consecuencia de disturbios antrópicos tales como los incendios forestales periódicos, producen efectos en los caudales de escurrimiento (Brown et al., 2005; Pierson et al., 2001; Santos et al., 2019; Robinet et al., 2018; Psomiadis et al., 2020). La escorrentía superficial corresponde a la respuesta directa de la cuenca ante un evento de precipitación y representa el exceso de agua que fluye por gravedad sobre la superficie del suelo.

Cualquier respuesta específica posterior a un incendio forestal está compuesta de cuatro procesos principales: precipitación, infiltración, escorrentía, erosión y transporte de suelo y sedimentos. Asimismo, estos procesos están condicionados a la humedad del suelo y a la rugosidad de la superficie y a mecanismos de retroalimentación (Moody et al., 2013). La destrucción de la vegetación y la reducción de la infiltración del suelo, dependiendo de la severidad del incendio, tienden a causar un mayor flujo superficial y escorrentía (Scott et al., 1998; Robichaud et al., 2000; Shakesby y Dorerr, 2006; Moody et al., 2013).

Los hidrogramas posteriores a un incendio forestal son difíciles de predecir debido a la insuficiencia de datos sobre las propiedades del suelo y la falta de datos de lluvia y escorrentía para las cuencas quemadas, que generalmente no están aforadas (Moody et al., 2008). A pesar de ello, la respuesta hidrológica de los incendios forestales ha sido estimada mediante el método del Número de Curva (NC) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos (NRCS, por sus siglas en inglés) (por ejemplo, Cerrelli et al., 2005; Foltz et al., 2009; Soulis, 2018; Psomiadis et al., 2020). El método requiere algún tipo de modelo de enrutamiento de canal (por ejemplo, HEC-RAS, 2012) para predecir el hidrograma.

El modelo del NC es el método conceptual más simple y mejor documentado para predecir la escorrentía de las cuencas hidrográficas (NRCS, 2004). Es utilizado cuando se desea obtener una adecuada aproximación (Kent, 1968; SCS, 1972), de manera práctica, simple y directa (Silveira et al., 2000). Su aplicación se basa en la determinación de los NC que están ampliamente documentados en la literatura para variados usos y tipos de suelos (Chow et al., 1994). A partir de las tablas utilizadas para determinar los NC en cada situación en terreno, Cerrelli (2005) asumió que los NC asignados para las condiciones posteriores al incendio, serían los del tipo de cobertura de suelo desnudo o mala condición hidrológica, según cada caso (USDA, 2015). Asimismo, otros estudios indicaron que el uso de valores de NC ajustados por pendiente mejoraron significativamente las estimaciones de escorrentía (Mishra et al., 2014; Lal et al., 2015).

El método del número de curva puede usarse para estimar el efecto de los incendios forestales en la respuesta hidrológica de las áreas afectadas y para evaluar los riesgos hidrológicos asociados. Para ello, comúnmente se usa un promedio ponderado de todos los NC en una cuenca para reducir el número de cálculos y evitar subestimar valores de escorrentía (USDA, 2015).

En las sierras de Córdoba, donde el fuego es un factor de perturbación recurrente (Argañaraz et al., 2015; Sánchez et al., 2021; 2022), los incendios forestales reducen inmediata y considerablemente la capacidad de infiltración (Karlin et al., 2019). En zonas afectadas por incendios, las grandes pendientes y la actividad ganadera, favorecen procesos erosivos y pérdida de material, lo que implica una mayor probabilidad de ocurrencia de escorrentía durante eventos de alta intensidad (Giorgis et al., 2013; Karlin et al., 2019).

La hipótesis que se plantea es que los incendios forestales en las sierras de Córdoba, al disminuir y degradar las coberturas, afectan los procesos hidrológicos del suelo. Se espera encontrar un aumento en los caudales de escurrimiento de las cuencas afectadas. Para ello se propuso aplicar la metodología de automatización del NC mediante SIG originalmente propuesta por la Universidad Politécnica de Valencia y el Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX (Ferrer-Juliá, 2003).

Objetivo general

Evaluar los efectos hidrológicos de los incendios forestales en la cuenca del río Dolores (provincia de Córdoba), a partir de la determinación de los valores de número de curva y estimación de los escurrimientos generados.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la cuenca del río Dolores-San Marcos (Córdoba, Argentina).
2. Identificar los principales problemas socio-ambientales a partir del diagnóstico de la cuenca.
3. Delimitar la cuenca en base a imágenes DEM (Modelo Digital de Elevación) y definir la red de drenaje.
4. Calcular el Número de Curva (NC) mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para las condiciones previas y posteriores a los incendios.
5. Caracterizar los suelos y determinar los cambios en la cobertura después de los incendios.
6. Analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Dolores antes y después de los incendios.
7. Establecer recomendaciones y pautas de manejo para la cuenca del río Dolores.

2. Caracterización del área de estudio

2.1. Ubicación

La cuenca del Río Dolores-San Marcos, pertenece a la cuenca del Río Cruz del Eje (sistema de Salinas Grandes), situada al noroeste de la provincia de Córdoba, Argentina (Fig. 1). Tiene una superficie aproximada de 57617 ha y se ubica entre los paralelos 30°40'S y 31°02'S y los meridianos 64°25'W y 64°44'W. Abarca el extremo norte del departamento Punilla, correspondiente a la pedanía de Dolores, una pequeña porción del este del departamento Cruz del Eje, involucrando la localidad de San Marcos Sierras y el embalse Cruz del Eje ubicado al sur de la ciudad homónima, cabecera del departamento. Parte de la divisoria de aguas Norte-Noreste de la subcuenca cae dentro del extremo sur del departamento Ischilín, aunque sin involucrar ningún poblado del mismo (Fig. 1). Los límites orográficos son las Sierras Chicas al este y las Sierras de Perchel, Cuniputo y baja de San Marcos al oeste. Algunas de las localidades de mayor reconocimiento tanto provincial, como nacional son: La Cumbre, Capilla del Monte y San Marcos Sierras.

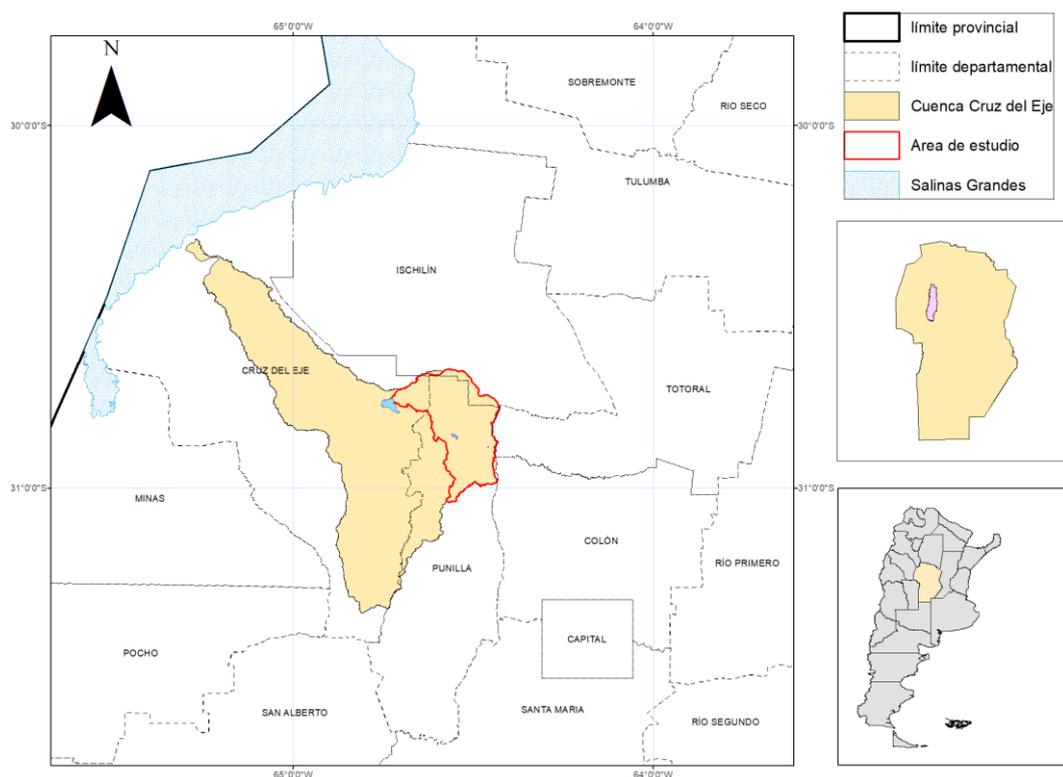


Figura 1. Ubicación de la cuenca Cruz del Eje y cuenca del río Dolores-San Marcos.
Fuente: . Elaboración propia.

2.2. Geología y geomorfología

La Sierra Chica, es un cordón serrano que se extiende por unos 200 km desde las sierras de Pajarillo-Copacabana-Masa al norte, hasta las sierras de Las Peñas al sur, entre los 30°36'S y los 32°38'S (Carignano et al., 2014a). Forma parte de la provincia geológica denominada Sierras Pampeanas Orientales (Ramos, 1999), caracterizada por rocas metamórficas instruidas por granitoides calcoalcalinos. Este conjunto de bloques asimétricos basculados, con laderas occidentales empinadas y orientales tendidas, deben su fisonomía al proceso de inversión tectónica que afectó fallas normales y estructuras extensivas cretácicas durante la orogenia andina, generando fallas inversas de alto ángulo y basculando la sierra por medio de la Falla de la Sierra Chica, provocando el gran escarpe occidental e intensificando la inclinación general de la vertiente oriental (Carignano et al., 2014a).

Estructuralmente, la zona de estudio se encuentra entre la Falla de Cuniputu, que levanta la serranía homónima al oeste y la Falla de la Sierra Chica al este (Martino y Guerischi, 2014). Es un gran valle interserrano que drena las aguas de la región hacia el noroeste provincial con nivel de base en el Embalse Cruz del Eje. La red de drenaje se desarrolla sobre el basamento Proterozoico-Paleozoico (metamorfitas y granitoides), el granito Capilla del Monte (intrusivo devónico), y las rocas sedimentarias cretácicas (Astini y Oviedo, 2014). Las divisorias de aguas que definen la cuenca hidrográfica están dadas por la línea de máxima altura de estas sierras al oeste (Cuniputu) y al este (Chica y Pajarillo-Copacabana-Masa), mientras que, al norte y al sur están dadas por la topografía heredada de la morfología domiforme de las rocas cristalinas y de los depósitos cuaternarios que constituyen los abanicos aluviales desarrollados al pie de la Sierra Chica. En la zona de estudio se encuentran los picos más elevados del cordón oriental de la provincia: el cerro Uritorco, con 1950 msnm, el Minas (1700 msnm) y el cerro Pajarillo (1594 m s.n.m) (Fig. 2).

El rasgo geomorfológico más sobresaliente es el quiebre de pendiente brusco que caracteriza la ladera occidental de la Sierra Chica y Pajarillo-Copacabana-Masa, éste queda evidenciado por la proximidad de las curvas de nivel en la zona de la serranía, es decir que, el terreno presenta grandes diferencias de altura en poco recorrido horizontal (pendientes elevadas) y el mayor espaciamiento que toman las curvas correspondientes a los abanicos aluviales, cuya topografía queda definida por el ángulo de reposo de los depósitos fluvio-aluviales que se acumulan por la pérdida repentina de capacidad y competencia que sufren los cauces fluviales al atravesar el quiebre de pendiente. En el mapa de curvas de nivel puede observarse que a partir de la línea de quiebre de pendiente las curvas de nivel definen un patrón cuasi paralelo y un espaciamiento que se mantiene relativamente parejo, esto responde a que, en toda la zona de estudio, la geomorfología de valle intermontano está controlada principalmente por el flujo de sedimentos que proviene de la Sierra Chica (SCh),

condicionada previamente por la geomorfología subyacente, correspondiente a las rocas de basamento. Al oeste, al pie de la sierra de Cuniputu (SCu), no se desarrollan abanicos aluviales como los mencionados anteriormente, esto puede explicarse por la menor altura y la ausencia de rocas sedimentarias en esta sierra, lo cual genera un menor influjo detrítico hacia el valle. Esto también explica el hecho de que los mayores abanicos aluviales se desarrollen al pie de la sierra de Pajarillo-Copacabana-Masa (SPCM) donde afloran espesos paquetes de sedimentitas cretácicas. Otro rasgo geomorfológico destacable es el mega deslizamiento del Cerro Uritorco (MDCU) (Carignano et al., 2014b). En las curvas de nivel éste queda expresado por una interrupción en el patrón de paralelismo y similitud en el espaciamiento de las curvas de nivel descrito anteriormente.

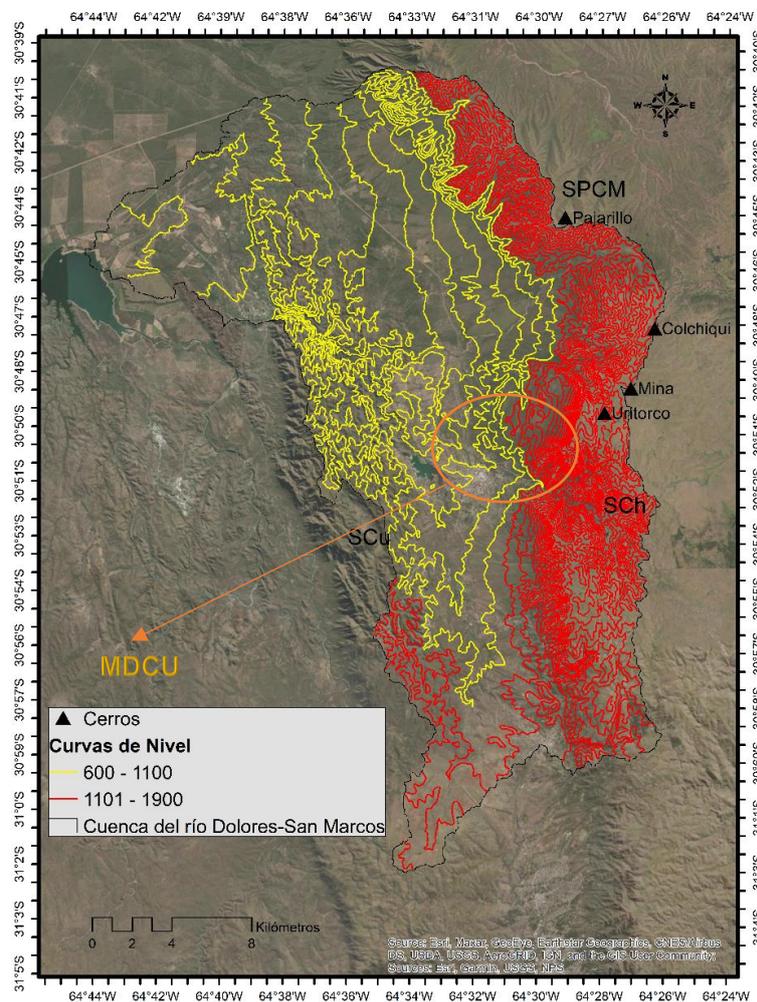


Figura 2. Geomorfología y curvas de nivel de la cuenca del río Dolores-San Marcos. Nótese el desarrollo de los mayores abanicos al pie de la sierra de Pajarillo-Copacabana-Masa. MDCU=Mega deslizamiento del Cerro Uritorco, Sch= Sierra Chica, SPCM= Sierra de Pajarillo-Copacabana-Masa, SCu= Sierra de Cuniputu. Fuente: MDE 30m (ING). Elaboración propia.

Diversos valles longitudinales conforman el área de estudio: Valle de San Marcos, Valle de Charbonier, el Valle de Dolores y el extremo norte del Valle de Punilla (Fig. 3). El valle de San Marcos Sierra (VSM), es una pequeña depresión tectónica limitada por fallas cuaternarias muy activas (Massabié, 1982; Massabié et al., 2002). Se ubica en el extremo norte de la sierra de Cuniputu, tiene una orientación SSE-NNO, con una longitud aproximada de 7 km y una anchura media de 3,5 km. Tiene una forma rectangular y en su extremo norte se abre hacia el Bolsón de las Salinas Grandes. En su interior, el río San Marcos ha formado un abanico aluvial, que a su vez ha sido disectado y aterrazado (Carignano et al., 2014a). El Valle de Charbonier se extiende en dirección SE-NO, desde el alto topográfico conformado por los sedimentos y bloques deslizados y rotados del MDCU, el más alto cerro del cordón de Sierras Chicas (Carignano et al., 2014b), hasta el piedemonte donde comienza el Bolsón de las Salinas Grandes, en el extremo norte de las sierras de Cuniputu y Masa. El valle está limitado al noreste por las sierras de Pajarillo-Copacabana-Masa, mientras que su vertiente suroeste es la superficie estructural de la sierra de Cuniputu (Carignano et al., 2014a). El valle de Dolores-San Esteban- está comprendido entre el MDCU (al norte) y el Alto de Santa Cecilia, próximo a La Cumbre (por el sur); mientras que el valle de Punilla (VPu) se extiende desde esa localidad hasta el alto de la Sierrita de Santiago (al sur) (Carignano et al., 2014a).



Figura 3. Visión panorámica de los valles y localidades que conforman el área de estudio. Fuente: <https://www.mapascordoba.gov.ar> y Google Earth. Elaboración propia.

2.3. Características climáticas generales

El clima de la región es semiárido. Dominio semi-húmedo, con tendencia al semi-seco, con invierno y sin verano (tipo Ascochinga) y de la montaña (Miatello et al., 1979). La precipitación media anual es de unos 800 mm, concentrada principalmente en la estación cálida (octubre a abril). Asimismo, las precipitaciones son irregulares, con oscilaciones sensibles de un año a otro. Los periodos de sequía traen graves consecuencias para las actividades agropecuarias, principalmente (Miatello et al., 1979). La temperatura media anual es de aproximadamente 13,9 °C (Capitanelli, 1979). Los inviernos son, por lo general, secos con registros de heladas típicas de zonas montañosas.

2.4. Características edáficas

En el área de estudio predominan los Entisoles, en la zona de Sierra, y Molisoles en los valles. Las Sierras de Córdoba se caracterizan por tener suelos de escaso desarrollo, formados por materiales de acarreo de diferente edad, en algunos casos transportados por el agua (aluviales) y en otros, por deslizamiento por gravedad (coluviales) (Hang et al., 2015). Estos suelos presentan gran cantidad de materia orgánica (>2,4%) y pertenecen a clase VII según la clasificación de uso de suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). El 24% de la superficie provincial posee estas características y son suelos cuya capacidad productiva está sujeta a la vegetación natural. Es por ello que, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) recomienda en estos suelos producir ganadería a base de pasturas naturales.

2.5. Hidrología e Hidrogeología

La red de ríos y arroyos que drenan la cuenca del Río Dolores-San Marcos nacen en las Sierras Chicas, donde la topografía y la litología dan lugar al desarrollo de una red de drenaje con diseño general dendrítico. En las zonas de nacientes, la incisión vertical genera una mayor concentración de cauces de escasa longitud y pendientes elevadas, son micro valles que socavan las rocas del basamento cristalino. En el caso de la sierra de Pajarillo-Copacabana-Masa, la red de drenaje tiende a un diseño en espinazo de pez, típico de rocas sedimentarias con menor resistencia a la erosión que las rocas de basamento. Al descender por la vertiente occidental de la Sierra Chica, los cauces se tornan más elongados y pierden pendiente al adentrarse en la llanura del valle intermontano donde alcanzan su colector principal, el Río Dolores que conduce los flujos de agua hacia el embalse de Cruz del Eje (Fig.4). Luego, las aguas corren hacia la planicie de inundación del Río Cruz del Eje, sustentando a un sistema bajo riego que se extiende hacia el noroeste provincial.

En las inmediaciones de la localidad de La Cumbre, nacen diferentes vertientes y arroyos que son afluentes del Río Dolores, colector principal de las aguas del Valle de Dolores. De circulación sur-norte, el Dolores corre al pie de la Sierra de Cuniputu (al oeste), reuniendo las aguas que bajan de la misma y, además, las provenientes de la Sierra Chica (al este). Próximo a Capilla del Monte, se ha construido el dique El Cajón, que embalsa sus aguas. A la salida del dique, el río Dolores se une al río Calabalumba, y continúa su serpenteo suave al pie de la Sierra de Cuniputu. De circulación este-oeste, el Calabalumba es el desagüe de la Sierra Chica en la zona de Capilla del Monte y el afluente más importante del Dolores. Nace en el paraje “La Toma”, donde confluyen el río Los Alazanes, que baja desde el dique homónimo, y el arroyo Del Plata, que viene desde Huertas Malas bordeando el cerro Uritorco. Unos 4 Km al norte de su unión con el Calabalumba, en el paraje Los Mogotes, el río Dolores sufre un cambio brusco de dirección, forzado por un evidente control tectónico-estructural que genera un codo de 90° hacia el Oeste, justo en la zona de su confluencia con las aguas temporarias del Río Seco, proveniente de la Quebrada de la Luna (Zilio y Zilio, 2007). A partir de aquí, el Río Dolores se adentrará en el valle de San Marcos donde cambia de nombre a Río San Marcos al atravesar el límite interdepartamental y, kilómetros antes de desembocar al dique Cruz del Eje, se le incorpora el Arroyo Los Sauces. Los ríos Dolores y Calabalumba son permanentes, pero poseen un régimen irregular, torrentosos en época de lluvias, y modestos, casi hasta desaparecer, en época de sequía (Zilio y Zilio, 2007).

A partir del mapa digital de elevación (DEM- por sus siglas en inglés) de la zona de estudio y el procesamiento del mismo, se determinó la red de drenaje de la cuenca del Río Dolores-San Marcos y se lograron delimitar cinco subcuencas (Fig. 4). En el área existen cinco estaciones de la red de mediciones de caudales y monitoreo de la calidad de los cursos de agua de la Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHI) del Ministerio de Servicios Públicos. Las estadísticas de las estaciones se encuentran disponibles por medio de la aplicación desarrollada para tal fin en el portal de la APRHI (<https://aprhi.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/>).

2.6. Vegetación

La vegetación del área de estudio corresponde al Distrito Chaqueño Serrano (Cabrera, 1976), componente orográfico de la región fitogeográfica del Parque Chaqueño. Dadas las diferentes regiones naturales en la provincia de Córdoba, el área de estudio se encuentra distribuida en mayor porcentaje dentro de la región natural "Sierras del Sur" y "Valles intermontanos". La vegetación nativa de las Sierras de Córdoba ha sido dividida en pisos o cinturones altitudinales de vegetación (Fig.5) (Luti et al., 1979; Cabido y Zak 1999):

Bosque de llanura pedemontana (<750 m s.n.m): dominado por quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*) y horco quebracho (*Schinopsis lorentzii*). La mayor parte de su antigua área de distribución está ahora ocupada por matorrales sustitutivos y paisajes culturales (Zak y Cabido, 2002) con un marcado incremento de espinillo (*Vachellia caven*), tusca (*Vachellia aroma*), garabato (*Senegalia praecox*) y algarrobo (*Prosopis* spp.).

Bosque Serrano (700 a 1100 m s.n.m): Se caracteriza por presentar una vegetación de tipo bosque de montaña subtropical seco, que se entremezcla con matorrales y pastizales. Las especies vegetales que dominan el estrato arbóreo son *S. lorentzii* y molle (*Lithraea molleoides*), acompañadas principalmente por espinillo (*Vachellia caven*), tala (*Celtis ehrenbergiana*), *Condalia* spp., manzano del campo (*Ruprechtia apetala*) y coco de las sierras (*Zanthoxylum coco*). Entre los arbustos se encuentran *Baccharis* spp., *Caesalpinia gilliesii*, *Colletia spinosissima* y *Schinus fasciculatus*; y entre las herbáceas abundan dicotiledóneas junto a gramínoideas de los géneros *Festuca*, *Nassella* y *Jarava*.

Actualmente, el Bosque Serrano se presenta en forma de parches aislados a lo largo de las laderas de las sierras y predominan las formaciones de matorrales y arbustales. Los matorrales de espinillo (*Vachellia* spp.) son el tipo de matorral predominante en la zona de montaña. En muchos lugares el arbustal reemplaza al bosque serrano donde éste ha sufrido algún disturbio como fuego o sobrepastoreo (Estrabou 1983; Cabido y Zak 1999). Las especies dominantes son diferentes en relación con el grado de perturbación humana, pero la composición también varía con la topografía y el sustrato. *Vachellia caven*, un arbolito caducifolio ampliamente distribuido en Argentina, es la especie más importante pero localmente pueden predominar *Flourensia campestris* y *F. oolepis*. Además, uno de los principales factores que contribuye a la reducción de la extensión original de la vegetación nativa es la invasión de especies leñosas exóticas como *Cotoneaster* spp., *Pyracantha* spp. y especialmente *Ligustrum lucidum*, que forma bosques monotípicos (Giorgis, 2011; Giorgis y Tecco, 2014). Al mismo tiempo, existen otras especies leñosas exóticas invadiendo distintas áreas serranas de la provincia de Córdoba: "Grateus" (*Crataegus monogyna*), "Acacia negra" (*Gleditsia triacanthos*), "Mora" (*Morus alba*) y "Paraíso" (*Melia azedarach*), entre otras. También hay especies arbustivas y herbáceas exóticas invasoras. Un caso particular es el

arbusto conocido como "Lantana" o "Bandera española" (*Lantana camara*). Esta especie, nativa del noreste de Argentina, es considerada como invasora en la provincia de Córdoba, y, además, está incluida en la lista de las 100 especies exóticas invasoras más dañinas del mundo.

Romerillar o Matorral serrano (1000 y 1100 m.s.n.m): A pesar de que existen zonas donde las comunidades arbustivas de romerillo (*Baccharis aliena*) dominan el paisaje, recientemente se ha sugerido que, a escala regional, el Romerillar no es un piso característico y continuo de las montañas de Córdoba, siendo en muchos sectores el pastizal la fisonomía en contacto con el sector superior del Bosque Serrano (Giorgis et al., 2011).

Pastizales y Bosquecillos de altura (>1100 m.s.n.m): Dominan las gramíneas *Festuca hieronymi*, *Nassella tenuissima*, *N. trichotoma*, *Paspalum dilatatum* y *P. notatum*.

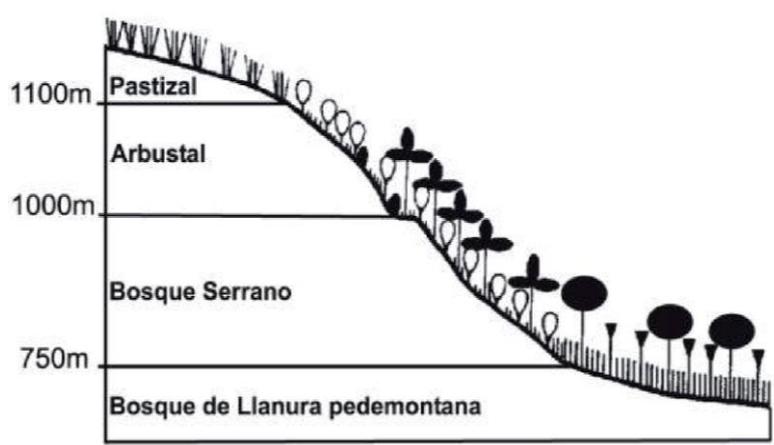


Figura 5. Perfil de la distribución altitudinal de la vegetación nativa en las Sierras Chicas. Fuentes: Kurtz (1904), Luti et al. (1979), Estrabou (1983) y Cabido y Zak (1999) en Gavier y Bucher (2004)

3. Caracterización sociocultural-territorial

3.1. La región de Punilla

La cuenca del Río Dolores-San Marcos abarca el extremo norte del departamento Punilla correspondiente a la pedanía de Dolores. Además, involucra una pequeña parte de las localidades de Cruz del Eje y San Marcos Sierras, correspondientes al departamento Cruz del Eje. Las localidades que conforman la pedanía de Dolores se encuentran intercomunicadas mediante las rutas nacional N°38, provincial E-76 y otros caminos alternativos.

La Región de Punilla, en general, ha evidenciado un crecimiento poblacional exponencial sostenido durante el siglo XX y lo que va del siglo XXI (Cattaneo et al., 2013). De acuerdo al último censo de población de la provincia (INDEC, 2010), Punilla creció en un 15% en tan solo nueve años (de 155.124 hab. en 2001 paso a tener 178.401 hab. en 2010). Una característica importante es que, la mayor parte de la población se ha concentrado en las urbes, tan sólo el 3,5% de la población corresponde a pobladores rurales. Para el año 2010 en el departamento Punilla, un 63% de los habitantes vivía en casa propia y un 22% eran inquilinos. Además, 94% de los hogares contaba con las necesidades básicas satisfechas, 95% tenía agua de red y 98% contaba con suministro de energía eléctrica. Los sistemas de cloacas y de distribución de gas de red eran insuficientes, con un 23,5% de hogares conectados al sistema cloacal y un 20% con gas de red. Esto se vincula directamente al vertido de efluentes cloacales sin tratamiento adecuado a los cauces fluviales y/o a las napas freáticas.

A continuación, se presenta una breve descripción de las localidades mencionadas más relevantes de la zona de Punilla.

La Cumbre: Ubicada a 80 km al Noroeste de la Ciudad de Córdoba capital, limita con la Cuenca Alta del Suquía o San Roque (hacia el sur). Según el censo del INDEC (2010), la Cumbre tenía una población de 7544 personas y, aunque la mayor parte de su población vive en el casco céntrico, el ejido municipal abarca los parajes de Cuchi Corral, Río Pintos, El Rosario y Tiu Mayú. La actividad económica principal de la localidad es el turismo. Los distintos parajes que la conforman corresponden a antiguas estancias y templos religiosos donde se aprecian diversos estilos arquitectónicos. A la gran oferta turística-gastronómica del lugar, se le suma la floricultura como segunda actividad económica, se producen campos de lavanda que, a su vez, constituyen sitios de interés turístico.

Los Cocos: Se encuentra sobre la ruta nacional E-76, a 5 km de La Cumbre ubicada a 1.200 msnm es la localidad más alta del Valle de Punilla. Con 1.242 habitantes (INDEC, 2010) que suele incrementarse un 50% en verano, es uno de los centros turísticos más

elegidos en el verano cordobés. El crecimiento demográfico acelerado de los últimos años trajo problemas asociados al desmonte debido al avance de la frontera urbana.

San Esteban: Ubicada sobre la ruta nacional N° 38, a 94 km de la ciudad de Córdoba. Tiene la particularidad de contar con dos núcleos poblacionales, uno es San Esteban propiamente dicho, y el otro es Dolores, ubicado unos 2 km al Norte. Es una localidad prácticamente fusionada a los Cocos y, junto a La Cumbre, conforman el aglomerado urbano “La Cumbre-Los Cocos-San Esteban”, con unos 9638 habitantes (INDEC, 2010).

Capilla Del Monte: Se encuentra a 109 Km de la ciudad de Córdoba sobre la ruta 38, es el centro turístico más importante de la pedanía de Dolores. Se extiende de Este a Oeste, desde el pie de los cerros Uritorco y Las Gemelas hasta el dique El Cajón, ubicado al pie de la ladera oriental de la sierra de Cuniputu.

3.2. Marco Legal e Institucional

Al encontrarse completamente dentro de la provincia de Córdoba, en esta cuenca se tendrá en particular consideración lo dispuesto por los artículos 41, 42, 43, 124 de la Constitución Nacional y los Artículos 11, 38, 48, 49, 59, 66, 68, 69, de la Constitución Provincial de Córdoba. También habrá de tomarse en consideración todas las leyes nacionales y provinciales y normativas municipales de las localidades implicadas.

Leyes nacionales

Ley 25.675 - Política Ambiental Nacional.

Ley 25.688 - Régimen de gestión ambiental de aguas.

Ley 24.051 - Ley de Residuos peligrosos.

Ley 26.331 - Ley de presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos.

Ley 26.562 - Ley de presupuestos mínimos de protección ambiental para control de actividades de quema.

Ley 26.815 - Ley de manejo del fuego.

Ley 27.279 - Ley de gestión de productos fitosanitarios.

Ley 27.287 - Sistema nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (SINAGIR)

Ley 27.353 - Sistema Federal del Manejo del Fuego

Ley 27.520 - Ley de Presupuestos Mínimos de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático Global.

Ley 25.831 - Régimen de Libre Acceso a la Información Pública Ambiental.

Leyes provinciales

Ley 10. 208 - Ley Provincial Ambiental.

Ley 10.467 - Plan Provincial Agroforestal

Ley 10.663 - Programa de Buenas Prácticas Agropecuarias de Córdoba

Ley 10.669 - Modificaciones a la Ley N° 8936, de Conservación y Protección de los Suelos

Ley 9.814/2010 – Ley de Presupuestos Mínimos para el Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de Córdoba.

Ley 9.588 - Convenio marco entre la provincia de Córdoba y el Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento.

Ley 8.973 - Adhesión provincial a la ley nacional N° 24.051.

Ley 8.751 Normas y procedimientos para el manejo del fuego.

Ley 7.343 - Principios Rectores para la Preservación, Conservación, Defensa y Mejoramiento del Ambiente.

Ley 6.964 - Régimen de Conservación de Áreas Naturales y Creación del Servicio Provincial de Áreas Naturales.

Ley 6.483 - Régimen de Actividades de Interés Turístico Especial

DECRETO N° 847/16 - Aprobación de reglamentación para la Preservación del Recurso Hídrico de la Provincia – (deroga dec 415/99).

3.3. Instituciones y actores en la cuenca

Ministerio de Gobierno.

Comité de la Cuenca del Dique Cruz del Eje y del Dique el Cajón. Modifica Ley N° 7863. Veto Total (Ley N° 8685, Julio 1998).

Administración Provincial de Recursos Hídricos

Secretaría de Ambiente de la Provincia de Córdoba.

Secretaría de Agricultura de la Provincia de Córdoba.

Administración Provincial de Recursos Hídricos.

Dirección de Turismo.

Departamentos ejecutivos: Municipalidad de Capilla del Monte, Municipalidad de Charbonier, Municipalidad de Los Cocos, Municipalidad de La Cumbre y Municipalidad de San Marcos Sierras.

Consorcio Canalero 10 de Mayo (0416-000697/14 – RESOLUCIÓN N° 150/14). Zona de Influencia: San Marcos, Monte Leña.

4. Diagnóstico

Actualmente, en la cuenca del río Dolores-San Marcos se presentan problemáticas de diferente índole que contribuyen a la degradación ambiental. Las causas de degradación aquí identificadas no son ajenas al resto de las sierras cordobesas y, entre las principales se mencionan a los incendios, el sobrepastoreo, la invasión de especies exóticas y el avance de la frontera urbana, entre otros. Si bien todos estos factores son relevantes al momento de planear soluciones que conduzcan a la sostenibilidad, este trabajo se enfocó en estudiar los incendios y los efectos hídricos que ellos conllevan, por ser uno de los problemas de mayor importancia debido a su extensión, frecuencia y factor condicionante en la producción/economía. Al final de esta sección (Fig.10) se puede observar el árbol de problemas confeccionado para la problemática en estudio, sus causas e impactos sobre el ambiente y la sociedad.

El diagnóstico de la situación actual de la cuenca se realizó sobre la base de una evaluación cualitativa, por medio de la foteointerpretación de imágenes satelitales y mapas de suelo, geología, drenaje, vegetación, uso actual del suelo y datos meteorológicos. Además, se llevaron a cabo entrevistas y una encuesta (semiestructurada) a vecinos de algunas de las localidades involucradas.

4.1. Análisis de cobertura y uso del suelo

La cuenca Dolores-San Marcos pertenece a la región (ecorregión) denominada Sierras del Sur. En el área de estudio se pueden observar los cuatro pisos altitudinales representativos de la vegetación nativa de Córdoba (Cabido y Zak, 1999). La fisonomía de la vegetación, que varía a lo largo del gradiente de elevación, es el resultado de una compleja retroalimentación entre clima, topografía y perturbación (es decir, incendios y pastoreo) (Giorgis et al., 2013; Giorgis et al., 2017; Argañaraz et al., 2020).

El tipo de cobertura vegetal que predomina en la cuenca es Bosque Serrano, debido a que el 60% de la superficie (34700 ha) corresponde a las categorías de Monte y Arbustales y Matorrales en base a la clasificación realizada por García et al., (2017) en el Mapa de Cobertura del suelo para la provincia de Córdoba (Fig. 6). Los Pastizales, con aproximadamente 16.000 ha, representan el 30% de la superficie total y se sitúan principalmente en la zona alta de montaña. El resto de la superficie de la cuenca es atribuida al tipo de uso del suelo antrópico; correspondiendo a los centros urbanos de la región, en el valle intermontano.

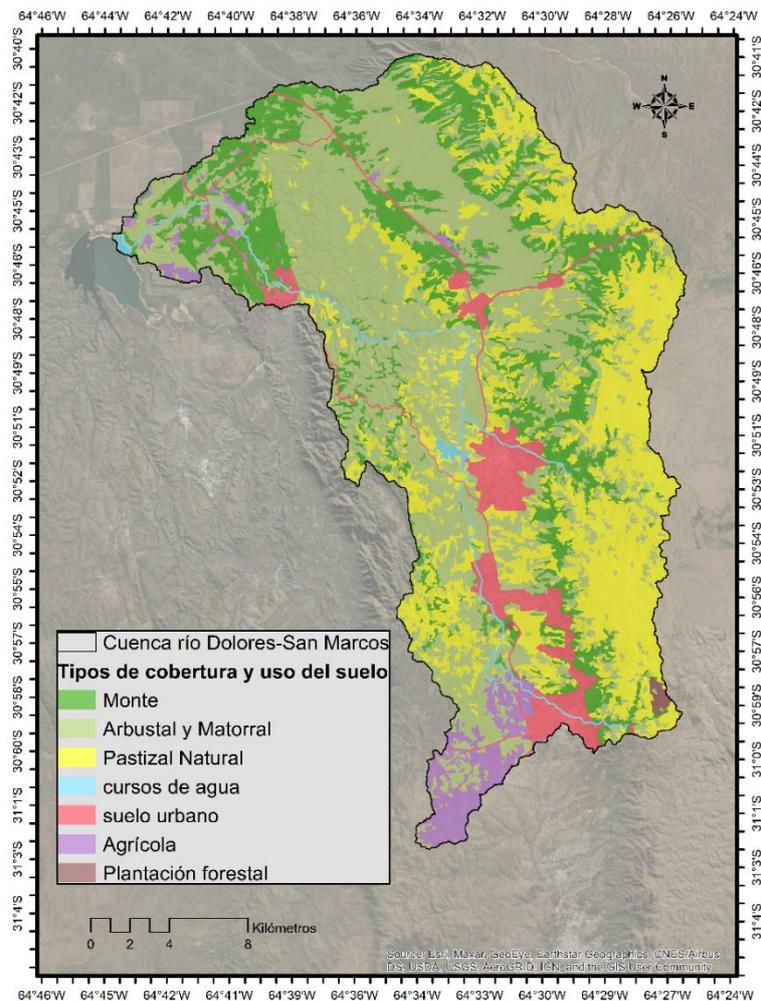


Figura 6. Mapa de coberturas vegetales y usos del suelo de la cuenca del río Dolores-San Marcos. Fuente: Mapa de coberturas vegetales (IDECOR). Elaboración propia.

4.2. Problemáticas socio-ambientales

4.2.1. Incendios forestales

La degradación del bosque y su transformación en arbustales o pastizales está asociada a cuatro factores fundamentales: el sobrepastoreo, la tala, los incendios, y la invasión de especies exóticas (Gavier y Bucher, 2004). En la región, los incendios forestales típicamente ocurren al finalizar la estación seca, propiciados por el aumento de las temperaturas, la escasa humedad de la biomasa combustible y los vientos que alcanzan alta velocidad. Existen dos factores importantes que predisponen a un incremento en la actividad del fuego en esta región, modificando su régimen (Kunst y Bravo, 2003). Por un lado, el aumento en las precipitaciones en las últimas décadas ha provocado un aumento en la producción de biomasa combustible que favorece el desarrollo de los incendios (Miglietta, 1994; Bravo et al., 2010). Por otro lado, el aumento de las igniciones antrópicas, accidentales

o intencionales, asociadas a la expansión poblacional sobre las áreas naturales. Las frecuencias de fuego reportadas en la actualidad son consideradas entre las más elevadas de Argentina central (Argañaraz, 2016).

A partir del procesamiento de imágenes MODIS (MOD64A1), obtenidas en forma gratuita del portal web del servicio geológico estadounidense (U.S. Geological Survey) (<https://earthexplorer.usgs.gov>), se determinaron las áreas quemadas y la frecuencia de incendios en el área de estudio.

Se determinó una frecuencia de incendios máxima de cinco eventos en 20 años (período 2001-2020). La región más afectada fue la ladera occidental de las Sierras Chicas y, en particular, el extremo sur de la cuenca, que corresponde al departamento Punilla (Fig. 7). En el año 2020 fueron afectadas con incendios aproximadamente 47.000 ha del departamento Punilla, de las cuales 13 mil corresponden al área de estudio (Fig. 8).

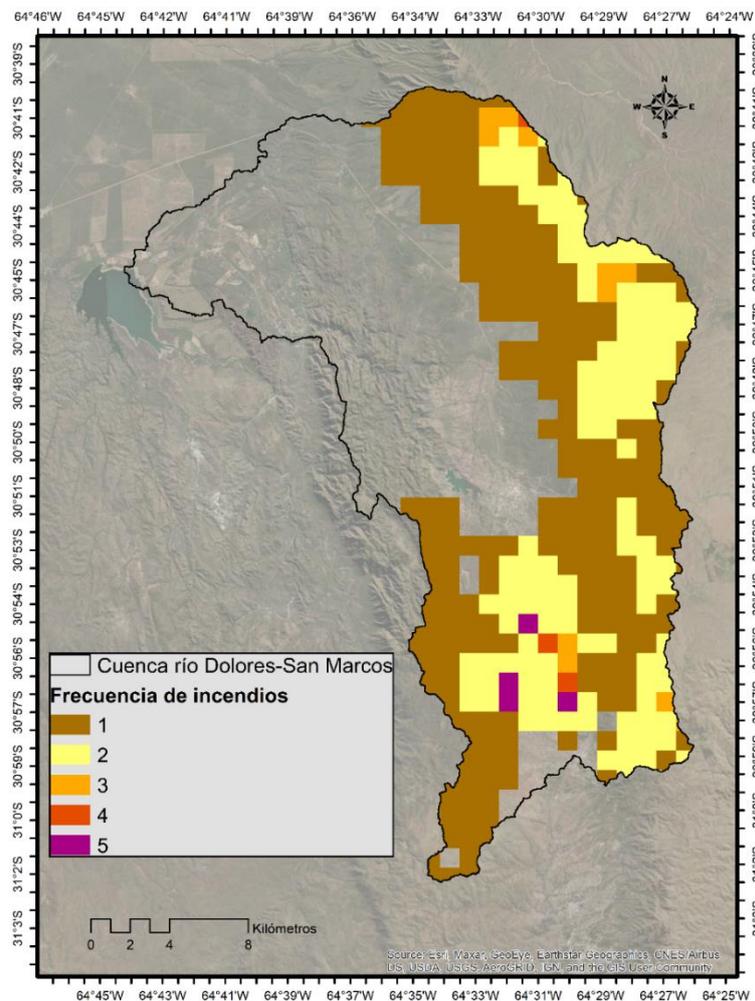


Figura 7. Mapa de frecuencia de incendios para el período 2001-2020 en la cuenca del río Dolores-San Marcos.

Fuente: Imágenes MODIS (MCD64A1). Elaboración propia.

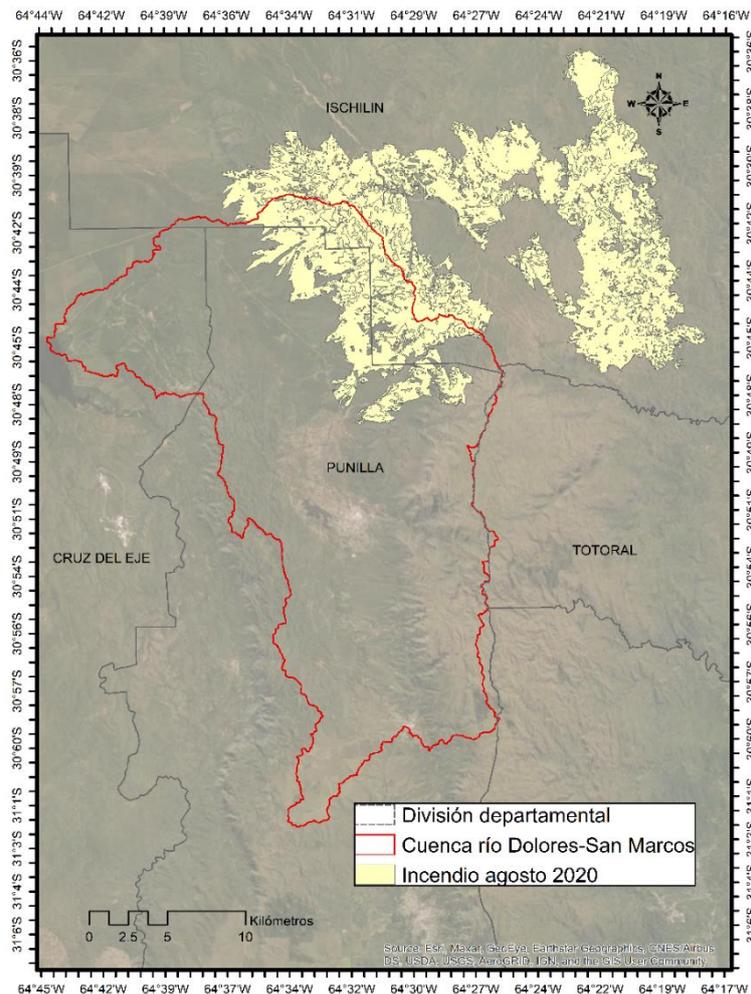


Figura 8. Área Quemada durante el mes de agosto del año 2020 en la cuenca del río Dolores-San Marcos.
Se observa la división departamental que comprende y colinda con el área de estudio. Elaboración propia a partir de la imagen satelital Landsat-8 del día 25/08/2020.

4.2.2. Erosión hídrica

Los suelos de escaso espesor y poco desarrollo de las Sierras de Córdoba al perder la vegetación por acción del fuego recurrente, quedan expuestos a insolación, acción del viento y escorrentía, ampliando las condiciones mecánicas de degradación de las pendientes lo que profundiza la destrucción del bosque serrano (Herrera et al., 1978; Beguet et al., 1987) (Fig. 9).

La pérdida de vegetación nativa por diversas causas antrópicas en las Sierras de Córdoba (principalmente desmontes, incendios, sobrepastoreo y avance indiscriminado de las urbanizaciones en las cuencas) implicó una reducción de los caudales base de los cursos de agua (Cingolani et al., 2015), y en contrapartida, se ha observado un aumento de las escorrentías y violencia de las crecidas de arroyos y ríos en época de lluvias.

Aunque en el registro reciente las crecidas y desbordes afectaron más a las zonas centro y sur de Punilla, los últimos eventos ocasionaron severos daños y complicaciones en localidades del norte, aledañas a la cuenca en estudio. Por ejemplo, el 28 de diciembre de 2020 y el 15 de enero de 2021, se produjeron importantes tormentas en las que, en pocos minutos, se registraron precipitaciones de 80 y 140 mm respectivamente, generando crecidas en los ríos y complicaciones en la zona urbana de varias localidades de la cuenca alta del río Suquía, como La Falda (la más afectada en 2021), Huerta Grande, Valle Hermoso y Villa Giardino.



Figura 9. Signos de pérdida de suelo provocado por la erosión tras los incendios.
Foto tomada en diciembre de 2020 en el área de estudio.

4.2.3. Escasez de agua potable

Los problemas hídricos principales para la zona de Capilla del Monte y Los Cocos son la escasez de agua y el deterioro de la calidad de la misma (Martina Fernández, Munic. Los Cocos, 22/02/21, com.pers.). La escasez es afectada por sequías severas y por la demanda, como consecuencia del incremento de la población, tanto estable como turística. El deterioro de la calidad es consecuencia de la deforestación, la expansión de la frontera agropecuaria, los incendios y en algunos casos, el vertido de efluentes. Asimismo, la calidad de las aguas superficiales depende en gran medida del tipo de roca por la que circulan. Mientras las aguas que escurren por rocas metamórficas y plutónicas suelen ser aptas para todo consumo, las que atraviesan rocas sedimentarias como las de la sierra de Pajarillo-Copacabana-Masa se cargan de sales y materiales finos en suspensión, perdiendo potabilidad a medida que se alejan de la sierra (Zilio y Zilio, 2007).

4.2.4. Residuos sólidos urbanos

En Capilla del Monte, el Basural a Cielo Abierto (BCA) situado a orillas del Río Calabalumba (ver foto del Anexo 2), representa un foco de contaminación notable. Está ubicado a unos 150 metros del cauce, sobre sustrato rocoso granítico intensamente fracturado, con muy escaso desarrollo de suelo y vegetación, lo cual favorece y acelera la infiltración de los lixiviados que pudiesen generarse a partir de los residuos allí almacenados e imposibilita el enterramiento de los mismos. Por otro lado, no cuenta con ningún tipo de seguridad que impida la entrada de cualquier persona al sitio de acopio, tampoco cuenta con alguna contención o infraestructura que detenga el transporte fluvio-eólico del material depositado, favoreciendo aún más el proceso de contaminación del aire, aguas y del paisaje en general

El problema más frecuente con los BCA son los incendios, generalmente son intencionales y ponen en riesgo de incendio forestal a zonas de bosque y arbustales, además de amenazar la calidad de vida y la salud pública en las zonas urbanizadas. El BCA de Capilla del Monte presenta un historial de recurrentes incendios intencionales que, por mal manejo de las actividades de quema, han puesto en peligro zonas urbanizadas y de bosque nativo. Este no es el único caso en la región, existen otros BCA con similares irregularidades en las localidades de La Cumbre, San Esteban-Los Cocos y San Marcos.

4.3. Áreas de Importancia para la conservación

4.3.1. Reservas Naturales

En la cuenca en estudio no existen reservas ni parques nacionales, tampoco reservas provinciales. Hay dos reservas municipales: Reserva Municipal Villa Cielo, Capilla del Monte y Reserva Forestal Natural Sierra de Cuniputu, San Marcos Sierras.

Algunas de las áreas privadas destinadas a la conservación (observadas al 10 de febrero de 2021) son: Reserva Natural Bosque los Sauces, Los Sauces; Semilla Madre reserva en El Sauco (San Marcos Sierras); Tierra de portales, Capilla del Monte y; Proyecto Carayá, La Cumbre.

4.3.2. Sitios Arqueológicos

Para la región de estudio, existen unos 30 sitios de patrimonio, Asentamientos Originarios y Sitios Arqueológicos (Anexo 3). El departamento Punilla es reconocido como aquel donde mayor cantidad de sitios se registran en toda la Provincia. El crecimiento poblacional de la zona afecta y amenaza el patrimonio arqueológico que se ubicaba inicialmente fuera de las áreas urbanas y que hoy se encuentra dentro de los conglomerados

urbanos. Además, existen en este departamento emprendimientos de minería que se basan principalmente en la extracción de áridos y piedras (cal, mica, cuarzos, lajas, etc.) y en algunos casos pueden afectar áreas que aún no han sido estudiadas destruyendo un valioso patrimonio arqueológico (Cattaneo et al., 2015).

4.4. Árbol de problemas

A partir de la información recopilada y procesada, se identificó como problema general el **alto riesgo de incendios** al que está expuesta la cuenca en estudio. Si bien las causas - generalmente- son difíciles de esclarecer, se estima que la mayoría de las igniciones tienen objetivos productivos y urbanísticos.

La mayor actividad de incendios observada durante y después de meses más secos en las Sierras, ha sido explicada por la combinación de altas temperaturas máximas, bajas precipitaciones, altas velocidades de viento y por el contenido de humedad de los combustibles (Argañaraz et al., 2015; Argañaraz et al., 2016; Sánchez et al., 2021). La alta recurrencia del fuego en la región serrana se debe tanto a factores biofísicos como antrópicos, señalando al clima y la geomorfología como los factores más importantes que limitan la ignición y/o propagación del fuego (Argañaraz et al., 2016).

Respecto a los efectos de los incendios sobre la vegetación, se sabe que las especies arbóreas y arbustivas más importantes del Chaco Serrano se regeneran por rebrotes de yemas en la base de los troncos (Gurvich et al., 2005; Verzino et al., 2005; Karlin et al., 2016) (Ver Fig.2 del Anexo 4). Asimismo, tras incendios de intensidad desconocida, en el cerro Las Gemelas y la zona del Uritorco, Verzino et al., (2005) indicaron la desaparición y reducción del estrato arbóreo. Además, la abundancia de la regeneración de las especies arbóreas y arbustivas más frecuentes, así como su diversidad, resultaron significativamente menor en sitios incendiados (Verzino et al., 2005). Esto podría indicar que la intensidad de los incendios podría jugar un rol clave en la posibilidad de regeneración de algunas especies nativas del Chaco Serrano.

Además de la afectación inmediata y observable sobre el paisaje, la flora y fauna que conllevan los incendios, el cambio en la cobertura vegetal conduce a procesos erosivos y degradativos a mediano y largo plazo, difíciles de cuantificar. Los impactos de los incendios, en síntesis, pueden traducirse en pérdidas de servicios ecosistémicos y disminución de la calidad de vida de las comunidades que habitan la región sujeta a incendios frecuentes.



Figura 10. Árbol de problemas elaborado para la cuenca del río Dolores-San Marcos.

5. Estimación del impacto de los incendios sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Dolores

En esta sección, se elabora un modelo hidrológico de transformación lluvia-caudal y tránsito-caudal para la condición previa y posterior a los incendios de 2020 en la cuenca del río Dolores. Los modelos adoptados en este estudio hacen uso de la metodología propuesta por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos. El cálculo del número de curva (NC) se realiza de manera automatizada y mediante el uso de fuentes de datos actualizados y de libre difusión (Ferrer-Juliá, 2003). La preparación de las capas y el modelado se realizó utilizando las herramientas y alcances de los softwares HEC-HMS (USACE, 2000), ArcGis (ESRI, 2017) y Global Mapper V. 18 (Blue Marbel, 2016). El área de estudio corresponde a la porción sur de la cuenca del río Dolores-San Marcos y fue el área más afectada por incendios en los últimos 20 años.

5.1. Fundamento teórico

5.1.1. Modelos Hidrológicos

Un modelo hidrológico es una aproximación al sistema hidrológico real, sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas (Chow et al., 1994). De esta manera, los modelos hidrológicos permiten la comprensión de la escorrentía facilitando su abstracción en modelos matemáticos capaces de simular su comportamiento y de cartografiar su distribución en el espacio.

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar según la distribución de las variables en el espacio. Por un lado, están los modelos distribuidos, y por otro los modelos agregados, que en muchos casos pueden considerarse como modelos semidistribuidos (Chow et al., 1988). En los primeros (distribuidos) la discretización de la cuenca se realiza a nivel de celda, alcanzando un nivel más detallado del sistema. Esto es una ventaja a nivel descriptivo, pero también puede convertirse en desventaja cuando la información disponible es escasa. Los segundos (agregados) agrupan los parámetros que definen la física del sistema hidrológico, es decir, los procesos físicos de la cuenca se asumen constantes en todo el dominio (cuenca) o subdominios (subcuencas). Además, los modelos pueden clasificarse según la aleatoriedad del evento que se analice en estocásticos o deterministas y, según su duración en el tiempo, en continuos o de eventos, entre otras clasificaciones (Ibáñez et al., 1995).

A la hora de elegir entre uno u otro modelo, se deben tener presentes los parámetros hidrológicos y modelos de transformación lluvia-escorrentía que incorporan, y si éstos están en concordancia con los objetivos del estudio.

Modelo numérico de simulación hidrológica: HEC-HMS

El Modelo HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System*) es un modelo de hidrograma de crecientes y es, probablemente, el modelo de simulación de evento más ampliamente utilizado. Este software permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos ya sea concentrados o distribuidos para el tránsito de caudales. Esta particularidad le otorga gran flexibilidad ya que permite combinar diferentes rutinas obteniendo así una mayor aproximación a la realidad.

Para el modelamiento hidrológico HEC-HMS tiene 4 componentes: 1) Modelo de la cuenca, 2) Modelo meteorológico, 3) Especificaciones de control y 4) Datos de entrada. Todos los parámetros físicos de la cuenca como las conexiones y parámetros de escorrentía están incluidos en el modelo de la cuenca.

Se vale del Modelo Digital de Elevación (MDE) para representar el elemento abiótico del paisaje de la cuenca, y conviene emplear en su construcción la red hidrológica para definir con mayor detalle las principales líneas de flujo del territorio drenado. También son útiles los parámetros de la velocidad de la corriente y la propagación de la onda de crecida (método de Muskingum-Cunge). En cuanto a las lluvias, son necesarias series cronológicas que nos permitan calcular la precipitación máxima según distintos períodos de retorno.

El método del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS)

El Soil Conservation Service (SCS) desarrolló un método (Ecuación 1) para estimar la escorrentía directa generada por un evento de lluvia con el siguiente modelo empírico (SRC, 1972). El método del Número de Curva NC permite obtener la escorrentía superficial acumulada (o lluvia neta acumulada) desde el comienzo del aguacero hasta un instante dado.

$$Q = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \quad (1)$$

Siendo:

Q: lámina de escurrimiento

P: lámina de lluvia

S: potencial máximo de retención.

Este último parámetro (S) se encuentra en función al número de curva (NC), el cual refleja la relación entre P y Q, basado en las características de la cuenca.

El Número de Curva (NC) se determina en función de los siguientes parámetros:

- Uso y cobertura del suelo: monte, pastizal, distintos tipos de cultivos, etc.

- Tratamiento o prácticas de manejo.
- Prácticas conservacionistas.
- Condición hidrológica (inclusión de rotaciones favorables)
- Características del suelo referidas a su capacidad de infiltración y producción de escurrimiento (textura; capas de diferente permeabilidad, etc.)
- Humedad antecedente (AMC, por sus siglas en inglés): AMCI, normal; AMCI, seca; AMCIII, húmeda. Los límites dependen de la lámina de lluvia acumulada durante los 5 días anteriores al evento considerado.

El valor de S varía entre cero (nula retención y máximo escurrimiento) e infinito (situación inversa). Su valor se relaciona con el NC de AMCII, según la siguiente expresión (para unidades métricas):

$$NC = \frac{25400}{S + 254} \quad (2)$$

Si S vale cero, NC es igual a 100, máximo valor que puede tomar para el cálculo del escurrimiento.

El método considera “pérdidas iniciales” (abstracción inicial, I_a – Initial abstraction, por sus siglas en inglés-) a la lámina de lluvia caída desde el inicio de la precipitación hasta el momento en que comienza el escurrimiento. Estas pérdidas están constituidas por: retención superficial + intercepción por la vegetación + infiltración previa a la iniciación del escurrimiento. La única condición necesaria es que dicha abstracción ($I_a = 0,2 * S$) no debe superar el agua caída de la tormenta (P). Los números de curvas quedan representados por el siguiente gráfico:

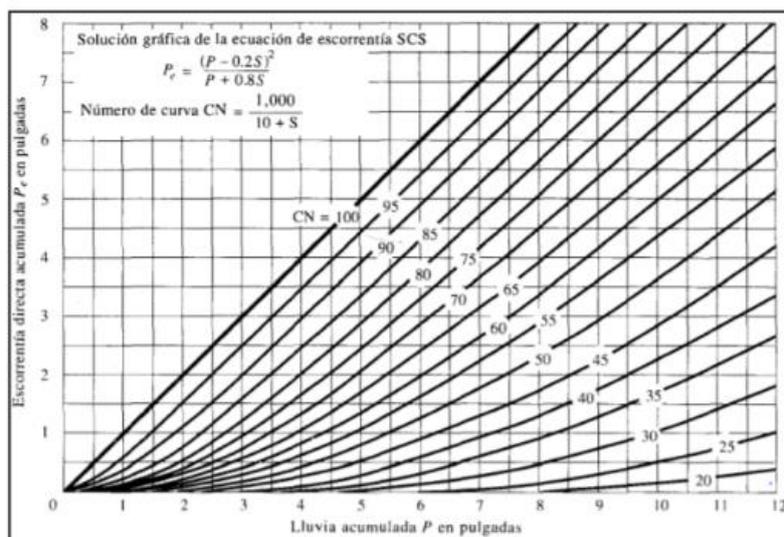


Figura 11. Representación gráfica de los NC.
Fuente: Chow, Maidment y Mays, 1994

Las curvas varían entre un parámetro que es igual a 0 (cuencas totalmente permeables, la lluvia no genera escurrimiento) y 100 (cuenca impermeable, es decir toda el agua precipitada aporta al escurrimiento directo).

La obtención del NC se hace por medio de tablas que consideran los parámetros mencionados arriba, para la condición AMC II. Luego hay que transformar este NC según la precipitación de los 5 días anteriores. Una vez obtenido el NC, se calcula la lámina de escurrimiento con la Ecuación 1.

El caudal pico, expresa la cantidad de escurrimiento instantáneo para una creciente máxima, que ocurre en una unidad de tiempo, expresada en l/s o m³/s, representada por el máximo caudal. Para esto se requieren datos de:

- ✓ Área.
- ✓ Longitud del cauce.
- ✓ Tipo de tormenta: de proyecto o hietograma.
- ✓ Pendiente.

5.2. Materiales y Métodos

5.2.1. Área de estudio

La cuenca del río Dolores forma parte de la cuenca Cruz del Eje y está situada al noroeste de la provincia de Córdoba, Argentina (Fig. 12). Tiene una superficie aproximada de 16000 ha y se ubica entre los paralelos 30°30'S y 31°02'S y los meridianos 64°26'W y 64°36'W.

El punto de salida de la cuenca corresponde al dique El Cajón, ubicado en la localidad de Capilla del Monte. Este embalse de 145 ha tiene capacidad para 8 Hm³ de agua y recibe aguas de los ríos Dolores (dirección sur-norte) y Calabalumba (dirección este-oeste). Ambos ríos son permanentes, pero poseen un régimen irregular y torrentoso, en época de lluvias, y modestos, casi hasta desaparecer, en época de sequía (Zilio y Zilio, 2007).

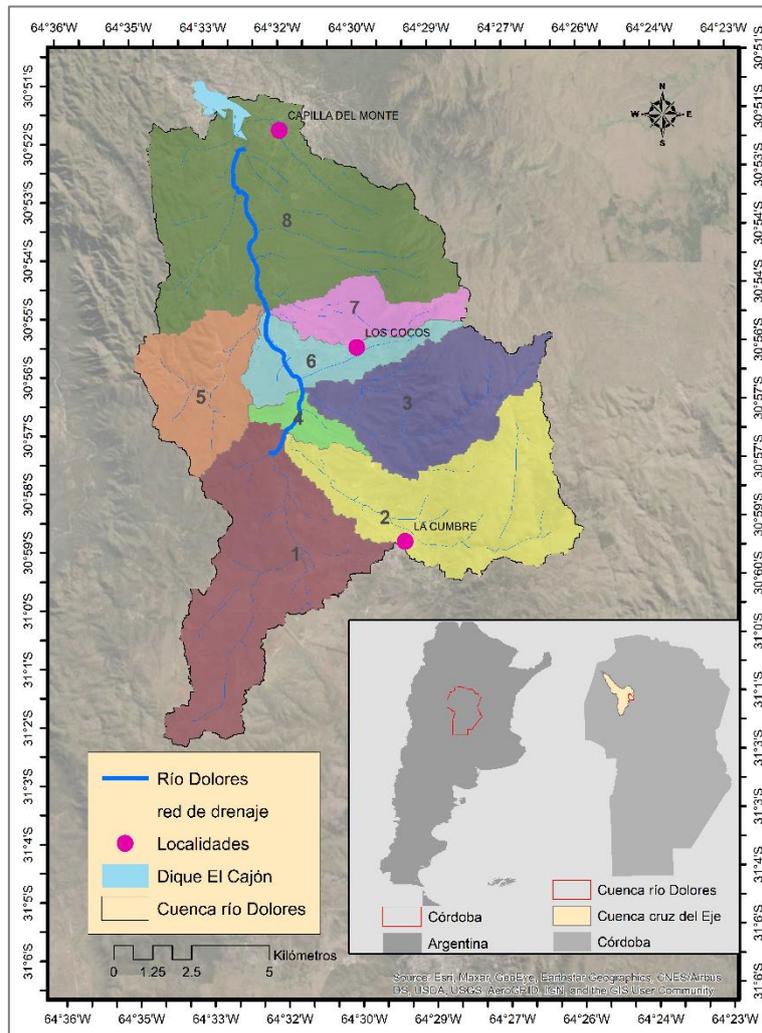


Figura 12. Ubicación de la cuenca del río Dolores y en **negrita** el número de las subcuenas que la componen.
Fuente: MDE 30m (IGN). Elaboración propia.

5.2.2. Modelo de la cuenca y delimitación de las subcuencas

Para la delimitación de las divisorias de agua y la red de drenaje, se trabajó con información topográfica provista por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) ex Instituto Geográfico Militar (IGM). Los datos que se utilizaron fueron las cartas topográficas de la región en escala 1:50.000 y un Modelo Digital de Elevación (MDE) de resolución de 30m x 30m (Fig. 13).

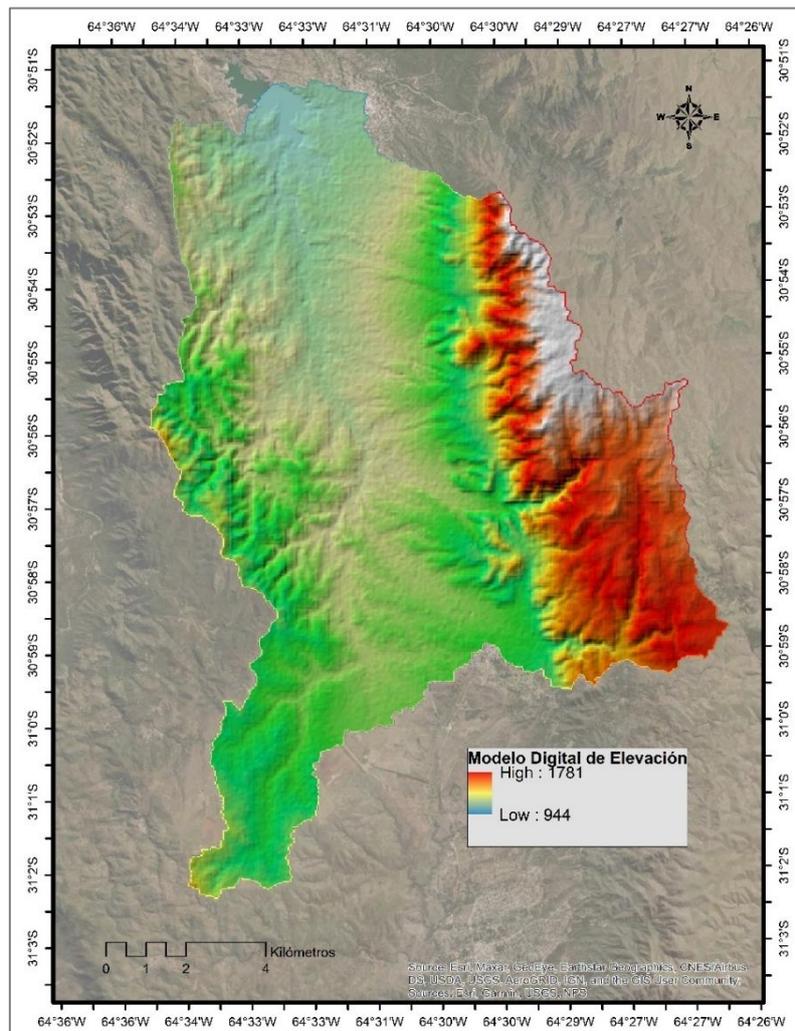


Figura 13. Elevaciones de la cuenca del río Dolores.
Fuente: MDE 30m (IGN). Elaboración propia.

En primer lugar, con el software Global Mapper V 18 y el MDE de 30 x 30 m, se procedió a delimitar las divisorias de agua y la red de drenaje. Luego, con el software ArcGIS 10.2 (ESRI, 2017) se realizó el ajuste de la red de drenaje haciendo uso del mapa de las cartas topográficas que proporcionaron mayor precisión y detalle del relieve. De esta manera, se delimitaron ocho subcuencas (Fig.12).

Las vías de escurrimiento que constituyen la red hídrica de la cuenca son naturales y la de mayor importancia, en base al caudal, es la que corresponde al río Dolores, atravesando

las subcuencas (Sb) 1, 4, 6 y 8. En los modelos de cuenca, se informa al programa de las distintas subcuencas y sus características, como el área, el método que se usará para la obtención del hidrograma, el número de curva y el tiempo de retraso o “lag time”. Un esquema de esa subdivisión con los elementos correspondientes para la modelación en HEC-HMS se presenta en la Fig. 14. Los parámetros calculados para cada una de las subcuencas se especifican en la Tabla 1.

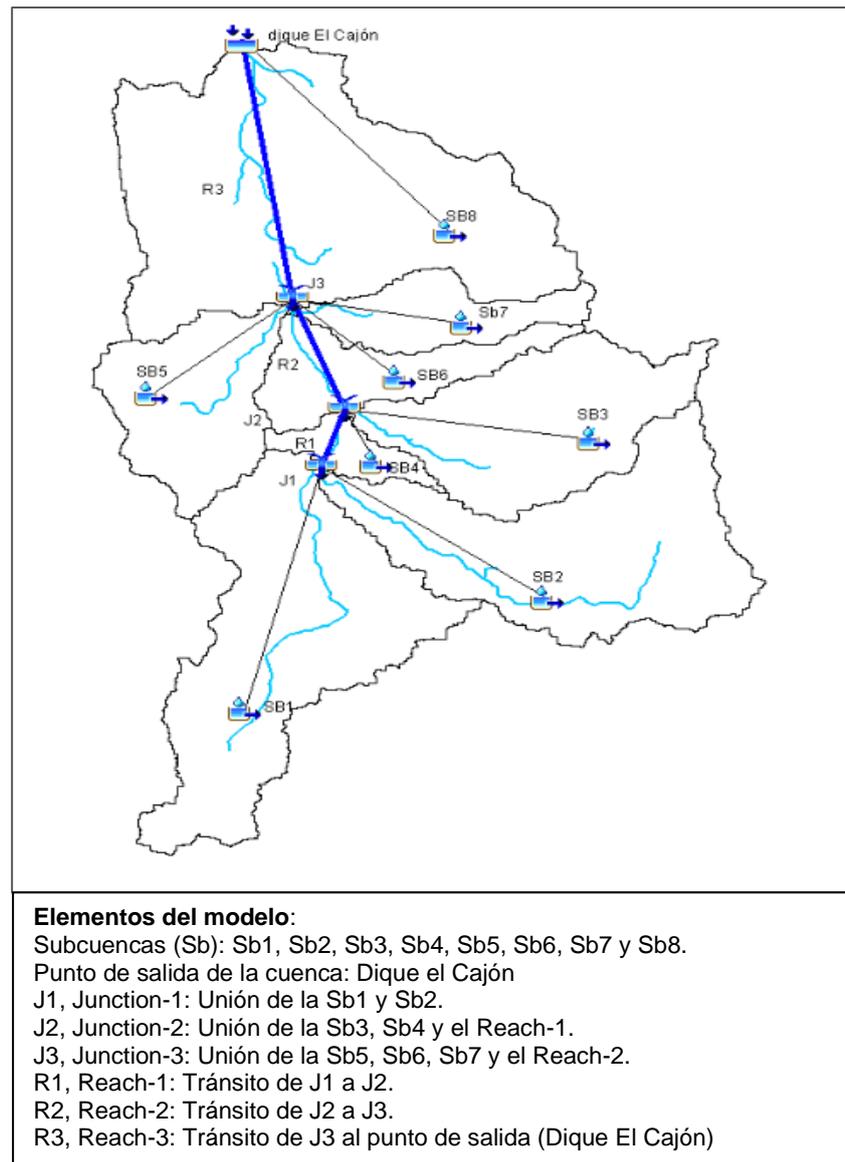


Figura 14. Representación esquemática del modelo de la cuenca del río Dolores. Elaborado en HEC-HMS. Elaboración propia.

5.2.3. Factores hidrográficos

La delimitación preliminar de la cuenca se realizó en base al MDE (modelo digital de elevación) de la cuenca de aporte. Se subdividió en ocho subcuencas (Sb) con sus diferentes

vías de escurrimiento para una mejor representación. A partir de la delimitación de los límites de la cuenca y las vías naturales de escurrimiento, se definieron distintos parámetros que permiten caracterizarla.

- **Longitud axial de la cuenca, La:** Distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca.
- **Ancho promedio, Ap:** Es la relación entre la superficie de la cuenca y su longitud axial.

$$Ap=A/La \quad (3)$$

Dónde:

Ap: Ancho promedio (km)

A: Área (km²)

La: longitud axial de la cuenca (km)

- **Longitud del curso principal, L:** Consiste en definir la longitud del curso (o línea de escurrimiento) principal de la cuenca (Sereno y col., 1997). La medida se determinó a partir de las vías de escurrimiento marcadas anteriormente.
- **Pendiente media del cauce principal, Sc:** Esta se infiere a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y su longitud.

$$Sc: ((H \text{ máx.} - H \text{ min.}) / L) * 100 \quad (4)$$

Dónde:

Sc: Pendiente media del cauce principal en %.

H máx.: Cota máxima en metros.

H min.: Cota mínima en metros.

L: Longitud del cauce principal en metros.

- **Pendiente media de la cuenca, Sa:** Esta se infiere a partir del desnivel topográfico de toda el área de la cuenca.

$$Sa: ((H \text{ máx.} - H \text{ min.}) / La) * 100 \quad (5)$$

Dónde:

Sa: Pendiente media de la cuenca en %.

H máx.: Cota máxima en metros.

H min.: Cota mínima en metros.

La: Longitud axial de la cuenca.

- **Tiempo de Concentración de la cuenca, Tc:** Es el tiempo requerido por una gota de agua para viajar desde el punto más remoto de una cuenca hasta su salida o boca, una vez que el suelo se satura (escorrentía). Desde el punto de vista empírico existen numerosas formas de calcular el tiempo de concentración, adaptando fórmulas a situaciones, lugares, ambientes y cuencas específicas.

En este caso, para el cálculo del tiempo de concentración de cada subcuenca se optó por el *Método de Kirpich*. Se basa en la siguiente fórmula:

$$t_c = 0,06628 * \left(\frac{L}{i^{0,5}} \right)^{0,77} \quad (6)$$

Dónde:

L: longitud del cauce más largo en km.

i: pendiente media del cauce en m/m.

t_c: tiempo de concentración expresado en horas.

- **Tiempo de retardo, Lag time:** Tiempo que transcurre desde el centro de gravedad del hietograma de precipitaciones al centro de gravedad del Hidrograma de caudales.

Para cada subcuenca, se determinó un tiempo de concentración y el tiempo de retardo, a partir de la siguiente relación:

$$T_{lag} = 0.6 * T_c \quad (7)$$

Parámetros calculados y computados en HEC-HMS para cada una de las subcuencas que conforman el área de estudio:

Tabla 1. Factores morfológicos, hidrográficos y climáticos para las subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Dolores.

Se presentan los resultados de los cálculos de área, longitud del cauce principal (L), pendiente media del cauce principal (Sc), tiempo de concentración (Tc), Tiempo de retardo (lag time) para cada una de las subcuencas analizadas. Además, se informa los resultados de intensidad media máxima (Int PP) y la lámina total (intensidad * Tc) para la tormenta de diseño.

Sub-cuenca	Área (km ²)	L (km)	Sc (%)	Tc (min)	Lag time (min)	PP (mm)	Int PP. (mm/h)	Lám total (mm)
1	31.27	9.48	1.03	132	79	110	21.8	47.9
2	27.17	7.43	3.20	70	42	110	33.7	39.1
3	21.61	6.20	5.08	51	31	110	41.6	35.4
4	3.03	1.41	0.42	43	26	110	46.5	33.5
5	14.56	3.98	3.13	44	26	110	46.1	33.6
6	8.91	2.87	1.21	49	30	110	42.6	34.9
7	7.53	4.46	11.55	29	18	110	60.3	29.5
8	46.07	6.19	1.08	95	57	110	27.3	43.1

5.2.4. Factores climáticos

Periodo de recurrencia y tormenta proyecto: El período de recurrencia (T_r) se define como el intervalo o lapso promedio de años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada.

Se consideró como tormenta de diseño a la precipitación máxima diaria con período de retorno (T_r) de diez años. Para el área de estudio, la precipitación con $T_r=10$ es de 110 mm (IDECOR, consultada en diciembre de 2021). Esta lámina se desagregó mediante la utilización de los coeficientes propuestos por Evans (Tabla 2) para la obtención de la curva I-D correspondiente (Fig. 15).

Tabla 2. Coeficientes de Evans (Evans, 1971).
Coeficientes para estimar la intensidad de la lluvia a partir de una lluvia máxima tipo en 24 horas.

Duración (h)	Factor de conversión
0.5	0.31
1	0.36
2	0.44
6	0.69
12	0.88
24	1

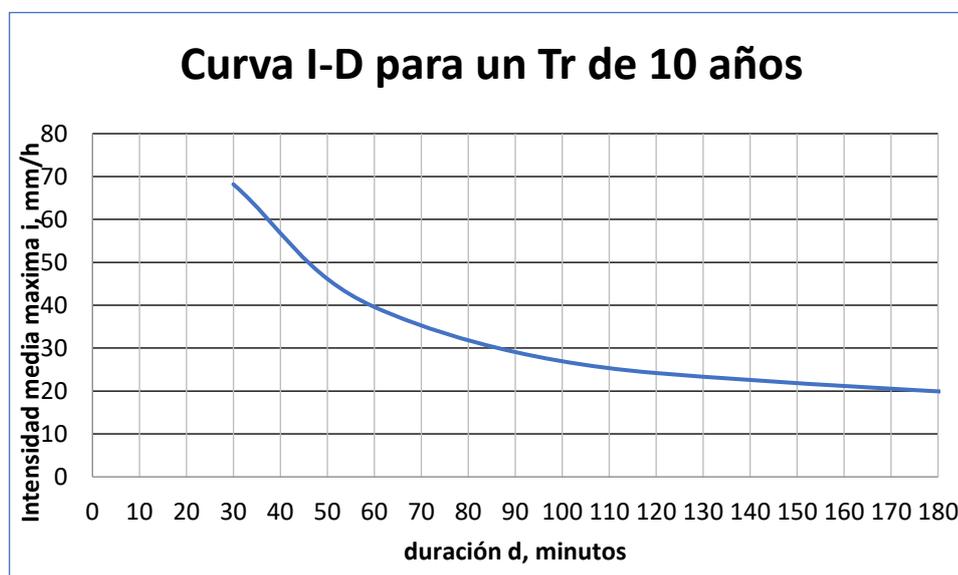


Figura 15. Curva I-D para una lluvia con tiempo de retorno de 10 años para el área de estudio.

A partir del tiempo de concentración de cada subcuenca y de la curva I-D, se obtuvo la intensidad máxima de la precipitación (mm/h). Estos valores se utilizaron para el cálculo de la lámina total de la tormenta de diseño (mm), la cual se obtuvo a partir del producto entre la

intensidad media máxima y la duración equivalente al tiempo de concentración, de la siguiente manera:

$$\text{Lam total (mm)} = \text{intensidad (mm/h)} \times \text{duración (h)} \quad (8)$$

Esta información puede observarse en la Tabla 1 y resulta básica para la estimación del escurrimiento.

Las láminas se afectaron según un patrón adimensional de distribución temporal interna (hietograma de diseño) provisto por estudios en la provincia de Córdoba que corresponden a los de la Zona Centro en función al tiempo considerado para la lámina total de cada subcuenca (Tc en min) (Caamaño Nelli y Dasso, 2005). Como se puede observar (Fig. 17) el pico máximo se da en el segundo sextil.

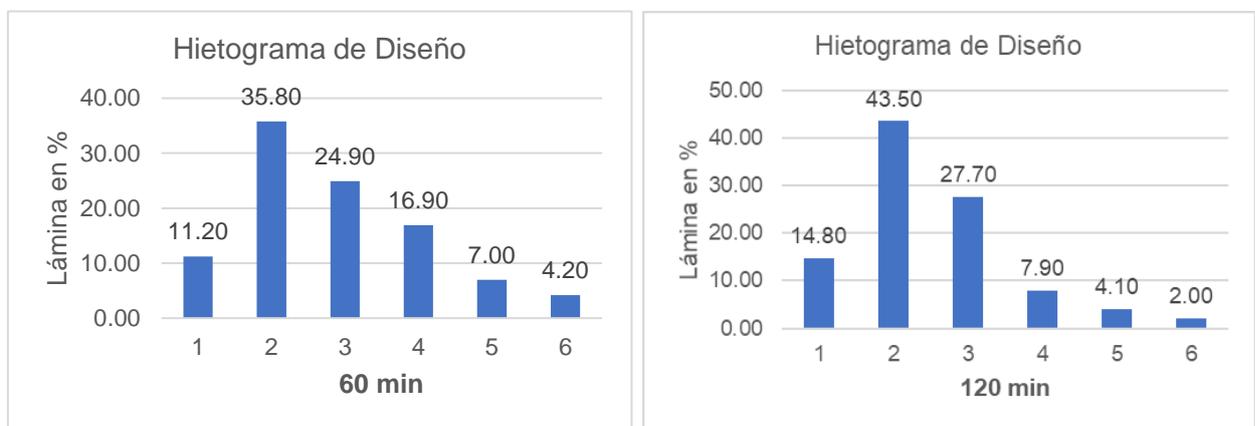


Figura 16. Patrón adimensional de distribución temporal de tormentas para la zona centro de la provincia de Córdoba.

A la izquierda, para una pp de 60 min para las subcuencas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 y; a la derecha, para una pp de 120 min para las subcuencas 1 y 8.

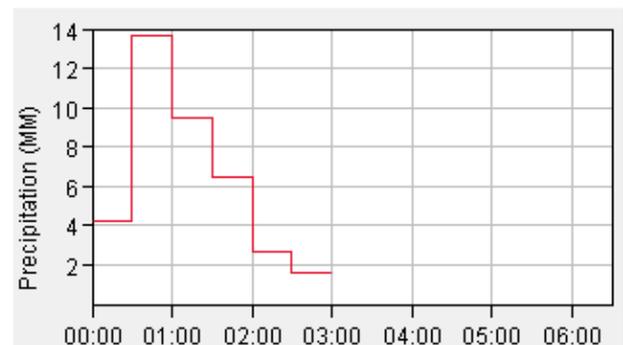
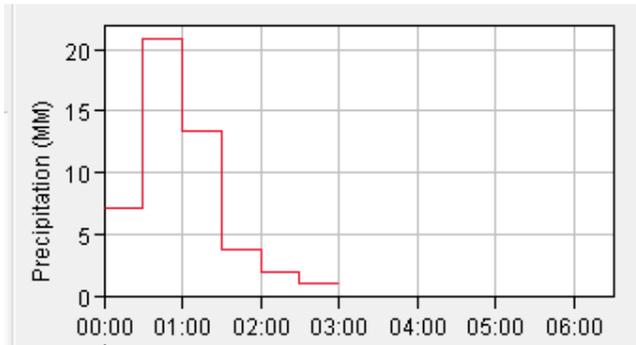
En la siguiente tabla (Tabla 3) se observa la aplicación de la distribución temporal de diseño sobre la lámina total, considerando 6 sextiles, afectado cada uno en función al porcentaje respectivo.

Tabla 3. Distribución temporal de la tormenta diseño aplicada a la lámina total de cada subcuenca.

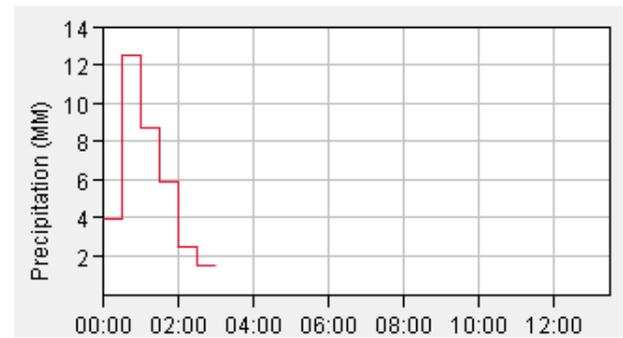
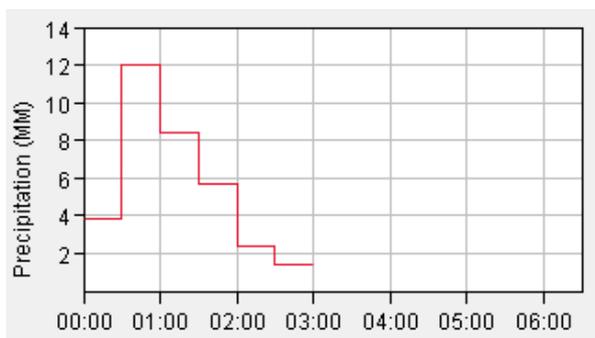
subcuenca	Distribución de la PP (mm) en sextiles					
	1	2	3	4	5	6
1	7.1	20.88	13.3	3.79	1.97	0.96
2	4.38	13.99	9.73	6.61	2.74	1.64
3	3.96	12.66	8.8	5.98	2.48	1.49
4	3.75	11.99	8.34	5.66	2.34	1.41
5	3.77	12	8.38	5.69	2.36	1.41
6	3.91	12.49	8.69	5.9	2.44	1.47
7	3.36	10.74	7.47	5.07	2.10	1.26
8	7.33	17.17	11.43	3.71	2.29	1.21

De esta forma, quedan representados los siguientes hietogramas de diseño para la lámina total considerada en cada subcuenca (Sb) (Fig. 17).

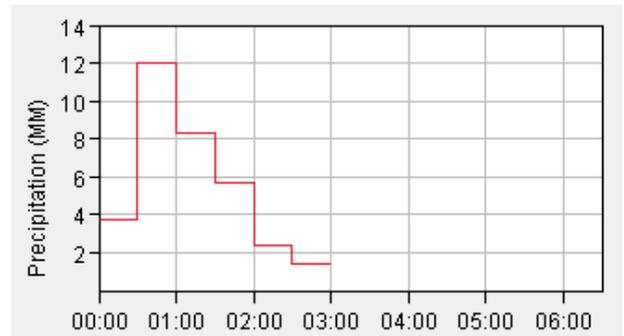
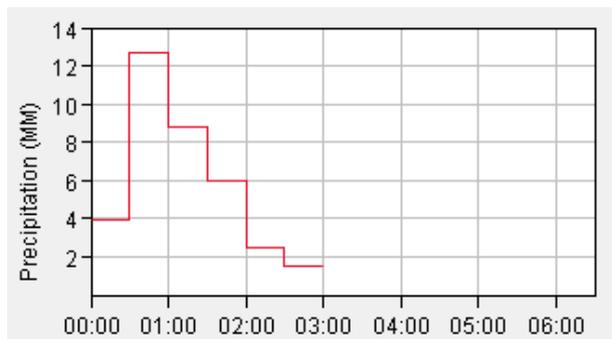
Sb 1Sb 2



Sb 3, Sb 4



Sb 5, Sb 6



Sb 7, Sb8

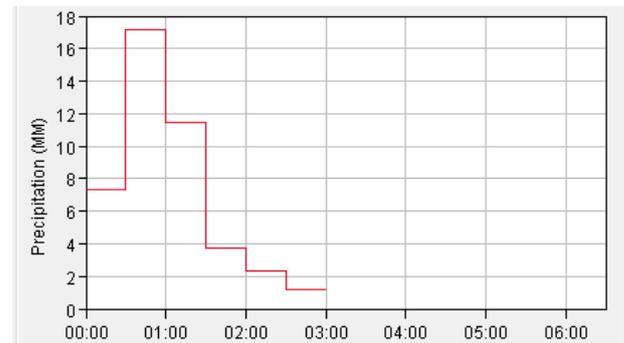
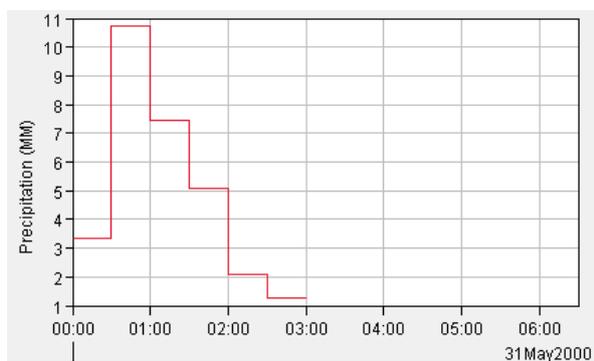


Figura 17. Hietogramas de diseño de las subcuencas que conforman el área de estudio.

5.2.5. Tránsito de cauces

Para los traslados a través de los cauces se utilizó el método de Muskingum. Dos parámetros son necesarios para el uso de este método:

k es una constante de almacenamiento que tiene dimensiones de tiempo. Definimos a k con la siguiente expresión:

$$k = L C \quad (9)$$

Donde L representa el largo del cauce y C la velocidad de la onda. A su vez:

$$C = 1,5 V \quad (10)$$

Donde V es la velocidad media de escorrentía.

x es un factor que expresa la influencia relativa del caudal de entrada y de los niveles de almacenamiento. Se adopta el valor 0,2 que es el que mejor expresa la influencia relativa del caudal de entrada frente a los niveles de almacenamiento.

5.2.6. Número de Curva (NC)

El empleo de Sistema de Información Geográfica (SIG) en la determinación del número de curva (NC) permite atenuar los problemas inherentes a la variabilidad de los parámetros físicos y geomorfológicos en una cuenca hidrográfica. Para ello, se generan capas de cartografía temáticas correspondientes a cada una de las variables que influyen en la determinación del parámetro número de curva, el cual resulta finalmente determinado mediante la realización de operaciones de reclasificación y superposición de las capas de información.

Para obtener el NC de cada celda se reclasifican las mismas en números primos (NP). Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos siempre dará un número diferente. Así pues, al multiplicar los mapas de tipo de cobertura, grupo hidrológico de suelo y pendiente (el equivalente a la superposición cartográfica de todos los factores implicados en el NC), se obtendrá un número diferente para cada una de las combinaciones de tres números primos. Posteriormente se establece una correlación entre el producto de números primos obtenido, y el número de curva correspondiente.

La asignación de un NC para cada NP, se basó en las tablas usadas por el SCS (Anexo 5), donde a cada combinación, le corresponde un NC que representa su potencial de escorrentía. La ponderación del valor de los píxeles da como resultado el NC final de cada subcuenca.

A continuación, se explica cómo se obtuvieron los parámetros que determinan el NC

Tipo de cobertura

Las condiciones de cobertura en una cuenca se caracterizan a través del tipo de cobertura, la densidad de la vegetación, también llamada condición hidrológica, y el tratamiento del terreno en las zonas de cultivo. En base al mapa Coberturas y Usos del Suelo de IDECOR (Fig. 18), se identificaron las tipologías de usos de suelo que establece el SCS y se le asignaron los números primos 13, 17, 19, 23, 29 y 31 para Monte, Plantaciones forestales, Arbustal y Matorral, Pastizal, agua, impermeable (infraestructura urbana y roca), y agrícola, respectivamente.

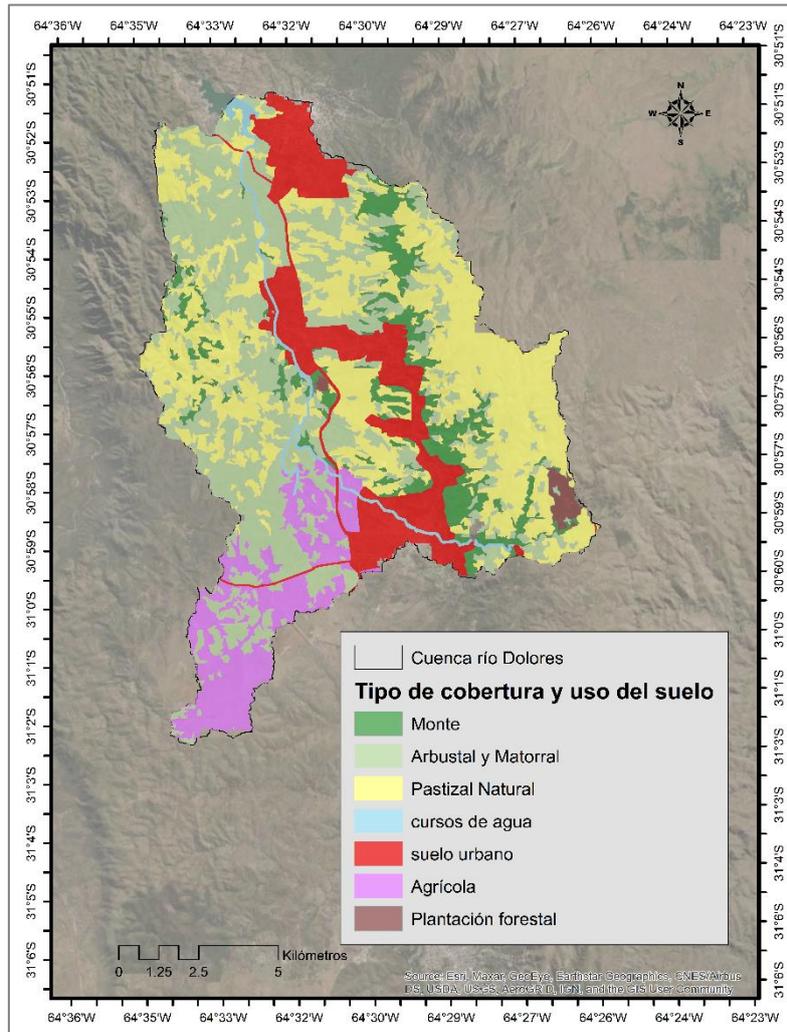


Figura 18. Mapa de coberturas y uso del suelo en la cuenca y subcuencas del río Dolores
Fuente: Mapa de cobertura y uso del suelo, IDECOR. Elaboración propia.

Características del suelo

En base a la capacidad de infiltración y producción de escurrimiento, el método considera cuatro clases hidrológicas de suelos (descritos en Anexo 5): A (Rápida infiltración), B (Infiltración Moderada), C (Infiltración Lenta), D (Infiltración muy lenta). Esta caracterización se utiliza para determinar el NC en una condición media de humedad antecedente (AMC II).

Para obtener la información edáfica del área de estudio, se utilizó el mapa Limitantes Edáficas en formato Shape File, descargado desde la página web de IDECOR. Esta capa de información corresponde a clases de textura superficial de suelos, proviene de las Cartas de Suelos de la Provincia de Córdoba (1:500.000). El área de estudio se encuadra dentro de los suelos Tipo A y B (Fig. 19), a los que se le asignaron los números primos 3 y 5, respectivamente. Debido al carácter areno-arcillosos, varían constantemente en el porcentaje

de ambos, permitiendo una mayor o menor permeabilidad. Son suelos poco cohesivos y fácilmente removibles por el agua y el viento (Pastore y Methol, 1953).

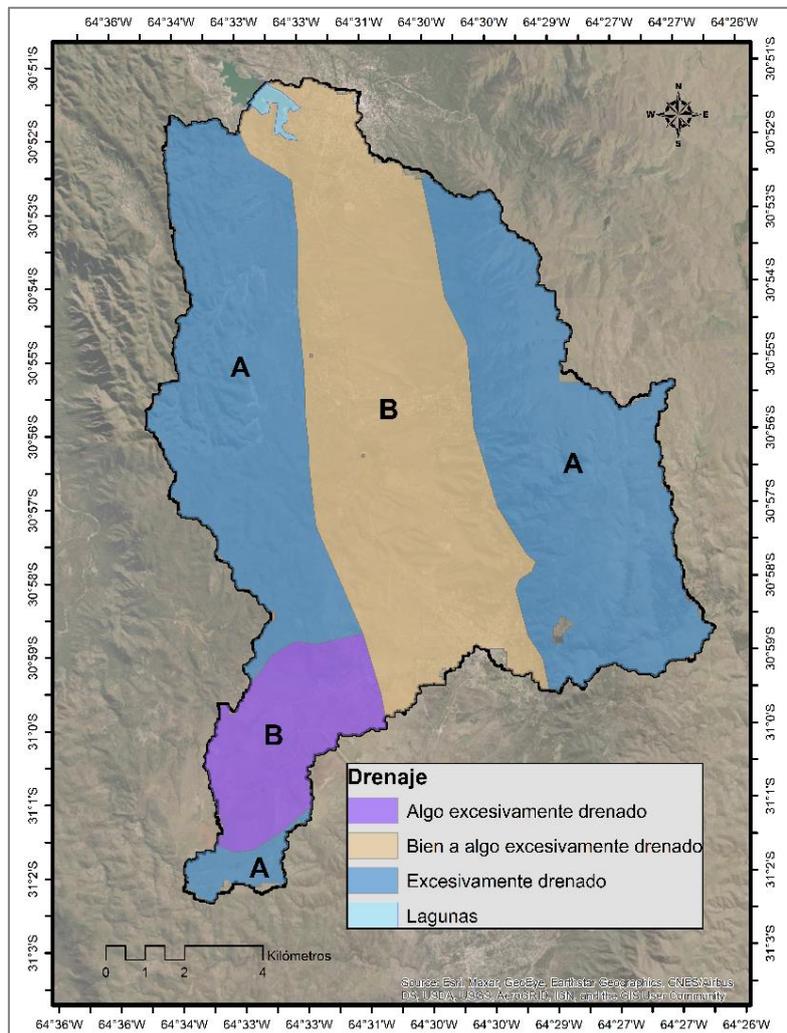


Figura 19. Tipo de grupo hidrológico de suelo (GHS) de la cuenca del río Dolores. Identificación y determinación de las características del suelo: Tipo de drenaje, en coloraciones azul, violeta, marrón y celeste. GHS: A -Rápida infiltración y B -Infiltración Moderada. Fuente: Mapa de Limitantes edáficas, IDECOR. Elaboración propia.

Humedad antecedente

Según las precipitaciones acumuladas en los cinco días anteriores al evento considerado, se asume que el suelo está en condición de humedad antecedente seca, media o húmeda (AMC I, AMC II o AMC III). La condición de humedad antecedente considerada es Tipo II (condición normal), con una abstracción inicial = 0.2 S.

Mapa de Pendientes

Para la obtención del mapa de pendientes, se necesita un Modelo de Elevación Digital (MDE), y mediante herramientas de análisis espacial se generaron las pendientes en porcentajes (Fig. 20). Una vez obtenido este mapa se procede a reclasificarlo en dos categorías en función de que la pendiente del terreno sea inferior o superior al 3%. A las celdas con pendiente inferior al 3% se les asignará el número primo 1, frente a las celdas de pendiente superior al 3% a las que se asignará el número primo 2.

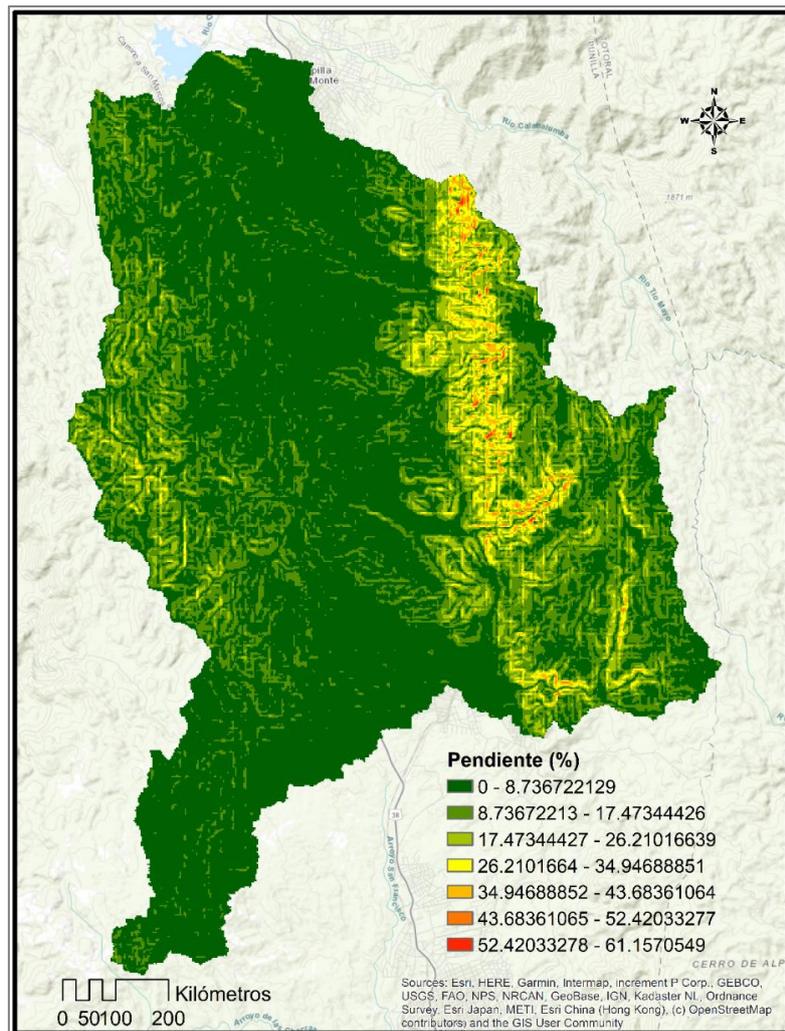


Figura 20. Mapa de pendientes de la cuenca del río Dolores. Fuente MDE 30m (IGN). Elaboración propia.

Mapa de Áreas quemadas

Se estudiaron los incendios ocurridos en septiembre y octubre de 2020 en la cuenca del río Dolores. Para obtener los datos de área quemada, se utilizó el producto Área Quemada de MODIS (MCD64A1). La superficie quemada total fue de 2836 ha, de las cuales: 272 ha corresponden a la categoría Monte, 25 ha a plantación forestal, 493 ha a Arbustal y Matorral, 1633 ha a Pastizal, 33 ha a zona urbana (incendio de interfase urbano-rural) y 379 ha a suelo agrícola (Fig. 21).

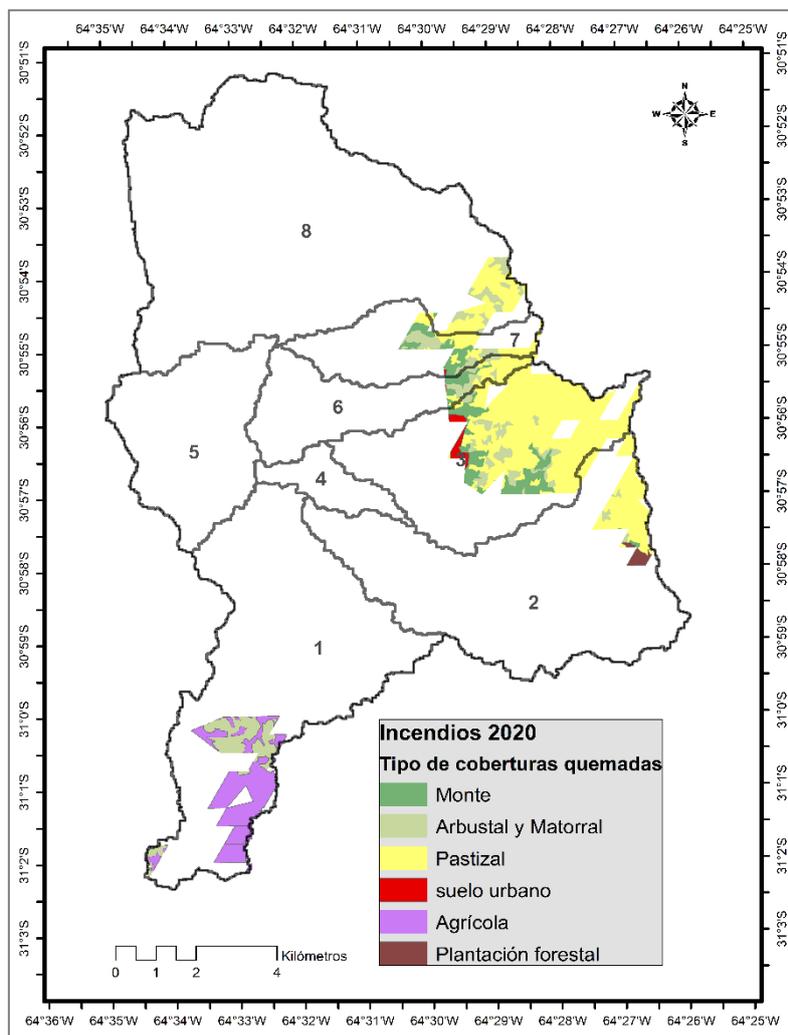


Figura 21. Mapa de cobertura quemada en los incendios de 2020 en la cuenca del río Dolores. Fuentes: Mapa de Coberturas y usos del suelo (IDECOR) y MODIS (MCD64A1) de la NASA.

5.3. Resultados

5.3.1. Determinación del Número de Curva

La Tabla 4 muestra las diferentes combinaciones de cobertura, pendiente y grupo hidrológico de suelo que fueron encontradas en la cuenca del río Dolores, para la situación previa (pre-fuego) y posterior al fuego (post-fuego). Siguiendo la metodología propuesta por Cerrelli (2005), se asignó a los pixeles quemados valores de NC de una condición de suelo más pobre que la condición pre-fuego, esto implica un mayor NC. Para la determinación del NC se tuvieron en cuenta, además, los antecedentes sobre la dinámica hídrica en suelos afectados por incendios de la región del centro de Córdoba de Karlin et al. (2019). El cambio de NC de cualquiera de las categorías repercute en el cálculo del escurrimiento a partir del cambio del NC de la celda (pixel) y, por ende, cambió el NC ponderado de cada subcuenca.

Tabla 4. Asignación y cálculo de valores de Número de Curva.

Cobertura y uso del suelo	NP	Pdte.	Grupo Hidrológico de suelo A (NP=3)			Grupo Hidrológico de suelo B (NP=5)		
			producto	NC Pre fuego	NC Post fuego	producto	NC Pre fuego	NC Post fuego
Bosque Serrano y plantaciones forestales	13	1	39	36	46	65	60	68
Arbustal y matorral	17	1	51	40	48	85	67	70
Pastizal	19	1	57	49	68	95	69	79
Agrícola	31	1	93	67	72	155	78	83
Urbano	29	1	87	72	82	145	82	92
Agua	23	1	69	98	98	115	98	98
Bosque Serrano y plantaciones forestales	13	2	78	46	56	130	68	75
Arbustal y matorral	17	2	102	50	58	170	68	77
Pastizal	19	2	114	68	75	190	79	86
Agrícola	31	2	186	72	77	310	83	88
Urbano	29	2	174	84	94	290	91	94
Agua	23	2	138	98	98	230	98	98

Los resultados de la Tabla 4 señalan que a medida que aumenta el desarrollo y la densidad de la vegetación, menor es la escorrentía y mayor la infiltración. El efecto de las plantas sobre la respuesta hidrológica del territorio se relaciona con su capacidad para mejorar la estructura del suelo y por ende su permeabilidad, aportar materia orgánica, retardar el flujo de agua sobre el terreno y prevenir el sellado de la superficie a causa del impacto directo de la lluvia (NRCS, 2004).

Ahora bien, aún bajo las mismas condiciones de vegetación, las características propias del suelo tienen un efecto importante sobre la producción de escorrentía. Esto se ve

reflejado en números de curva mayores para todas las categorías de vegetación, que se combinan con suelos del grupo B.

Situación pre-fuego

El NC ponderado para toda la cuenca en la situación previa al fuego fue de 64.5. Para esta situación, los valores más bajos se hallaron en los suelos del grupo A, cubiertos por Bosque, Matorrales y Pastizales; mientras que los valores más altos se dan en los suelos del grupo B, desprovistos de vegetación (suelo urbano) o bajo uso agrícola. A los cuerpos de agua se le asigna un NC igual a 98 porque toda la lluvia que cae sobre ellos se convierte directamente en escorrentía.

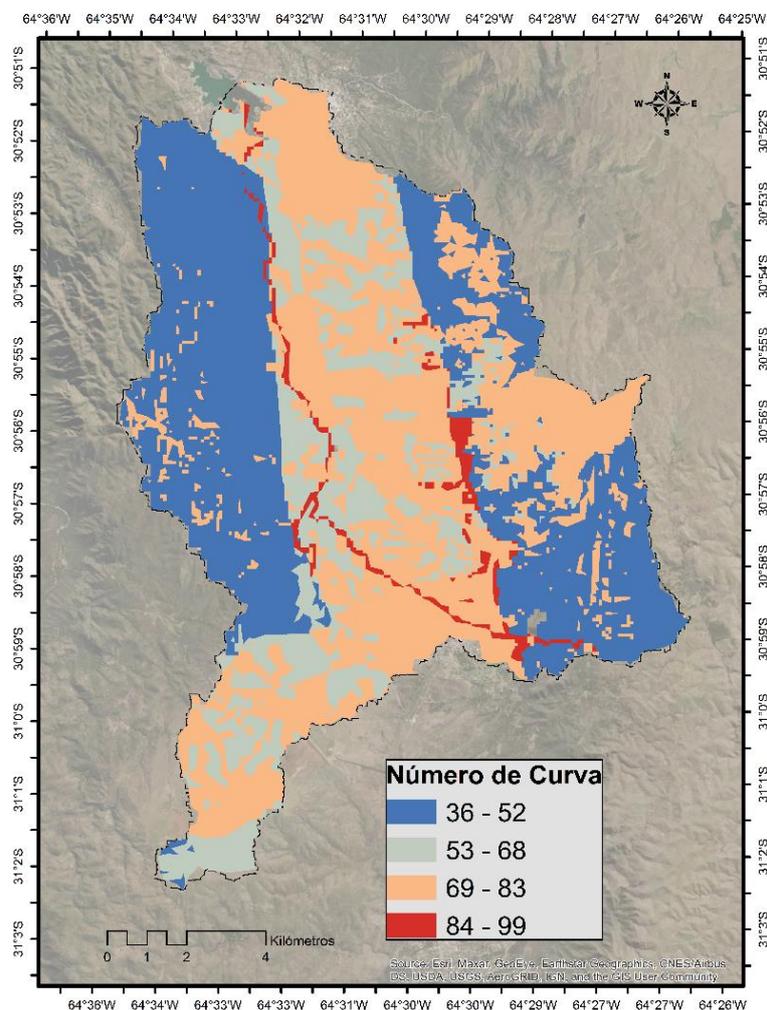


Figura 22. Mapa de Numero de curva resultante.

Situación post-fuego

Las subcuencas 1, 2, 3, 6, 7 y 8 fueron afectadas por fuego durante la temporada de incendios de 2020. El NC ponderado para toda la cuenca en la situación post-fuego fue de 67. En la Tabla 5 puede observarse el NC de cada subcuenca antes (pre-fuego) y después del incendio (post-fuego).

Tabla 5. Determinación del Número de Curva y superficie quemada para las subcuencas que conforman la cuenca del Río Dolores.

Subcuenca	NC pre fuego	Superficie Quemada (ha)	NC post fuego
1	68	420	74
2	67	222	69
3	66	1.134	70
4	68	0	68
5	60	0	60
6	63	121	65
7	66	172	70
8	58	190	59

5.3.2. Estimación del escurrimiento

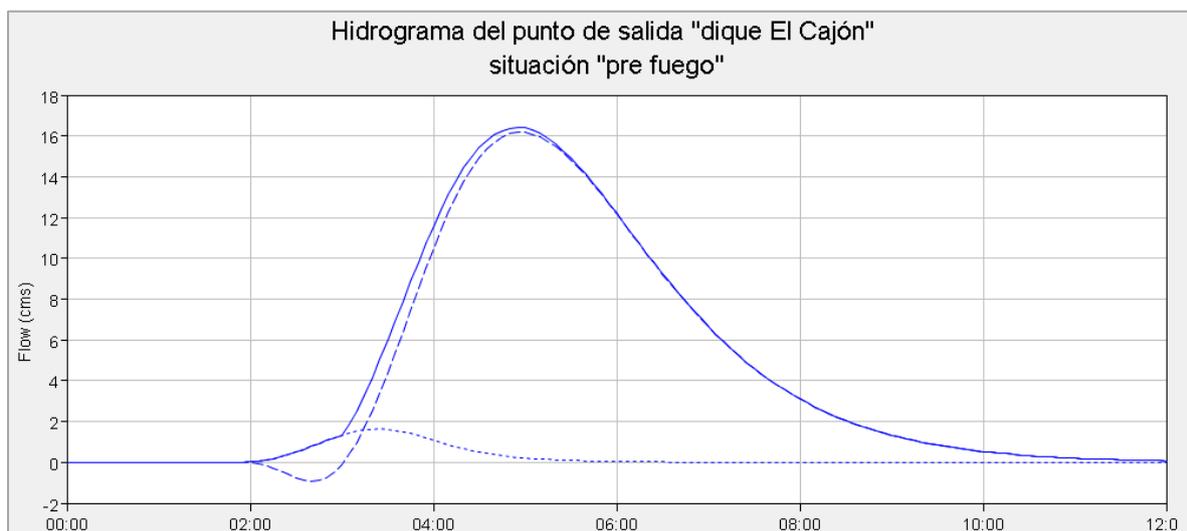
En todos los elementos del modelo puede apreciarse un incremento en el caudal y, además, un adelanto del orden de los 10 y 15 minutos al caudal pico. Los resultados que se muestran en la Tabla 6 corresponden a los puntos de mayor interés de la cuenca. Además, se presentan los hidrogramas del punto de salida (Fig. 23 y Fig. 25). y las tablas de resultados completas correspondientes a cada situación (Fig. 24 y Fig. 26).

Con el modelo hidrológico HEC-HMS 4.2.1 se obtuvieron resultados de escurrimiento en varios puntos de la cuenca. En la situación post-fuego el modelo muestra un incremento tanto del caudal de salida como de la lámina total escurrida de la cuenca (para una misma precipitación) respecto a la situación inicial (pre fuego). La diferencia del volumen escurrido en el punto de salida de la cuenca es de 1.18 mm (lámina unitaria). Este valor, afectado a la superficie de la cuenca, representa un volumen total escurrido de 1888000 m³. Relacionando esos incrementos con los cambios de coberturas de suelo, a raíz de los incendios, una pérdida del 3% de la superficie de Monte, 4% de Matorral y Arbustal y, un 12% de Pastizal Natural, conllevan a un incremento del 50% del caudal de salida (Dique el Cajón).

A medida que aumenta la superficie quemada, lo hace la fracción de la precipitación que escurre y aún más si el incendio se da en zona con alta pendiente (>3%). Esto puede verse reflejado en la J2 (unión de Sb3 y Sb4) después del incendio en la Sb3. Este punto corresponde a la unión del río Dolores (dirección sur-norte sobre Sb4) con el Arroyo Cruz Grande (dirección este-oeste sobre Sb3).

Tabla 6. Caudales y lámina escurrida resultados del modelo hidrológico HEC-HMS 3.3

Situación	Ubicación	Caudal pico de salida (m ³ /s)	Tiempo al pico (h)	Lámina escurrida total (mm)
Pre fuego	Punto de salida (Dique El Cajón)	16.4	04:55	1.21
	Junction 1 (unión Sb1 y Sb2)	22.0	02:55	2.82
	Junction 2 (unión Sb3 y Sb4)	22.4	03:15	2.17
	Junction 3 (unión Sb5, Sb6 y Sb7)	20.5	03:50	1.60
Post fuego	Punto de salida (Dique El Cajón)	32.0	04:40	2.39
	Junction 1 (unión Sb1 y Sb2)	38.4	02:45	5.01
	Junction 2 (unión Sb3 y Sb4)	42.2	03:05	4.30
	Junction 3 (unión Sb5, Sb6 y Sb7)	39.4	03:35	2.39



Referencias:

- Caudal escurrido en el punto de salida de la cuenca del río Dolores
- - - Caudal escurrido por las subcuencas (Sb) 1,2,3,4,5,6 y 7 que transita por la Sb8
- Caudal escurrido por la Sb 8.

Figura 23. Hidrograma de la cuenca del río Dolores para la situación pre fuego. Donde se representa gráficamente las descargas instantáneas de un curso de agua en función del tiempo, con un máximo caudal a la salida de la cuenca equivalente a 16.4 m³/s alcanzado a las 4.55 h de iniciado el evento.

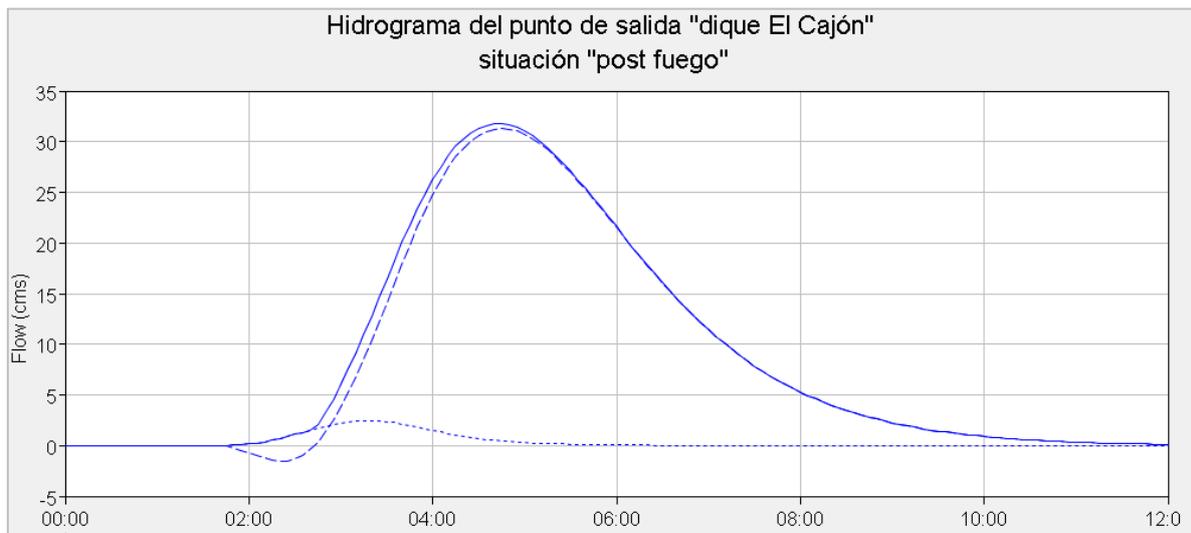
Project: tf_SOFIASANCHEZ Simulation Run: Run_Sin fuego

Start of Run: 31may2000, 00:00 Basin Model: Cuenca río Dolores
 End of Run: 31may2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 15mar2022, 13:07:11 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SB1	31.27	15.4	31may2000, 02:55	4.03
SB2	27.17	6.6	31may2000, 02:45	1.42
J1	58.44	22.0	31may2000, 02:55	2.82
R1	58.44	20.1	31may2000, 03:20	2.82
SB3	21.61	2.6	31may2000, 02:45	0.60
SB4	3.03	0.4	31may2000, 02:35	0.71
J2	83.08	22.4	31may2000, 03:15	2.17
R2	83.08	20.4	31may2000, 03:50	2.17
SB5	14.56	0.0	31may2000, 00:00	0.00
SB6	8.91	0.4	31may2000, 03:10	0.17
Sb7	7.53	0.2	31may2000, 03:05	0.11
J3	114.08	20.5	31may2000, 03:50	1.60
R3	114.08	16.2	31may2000, 04:55	1.60
SB8	46.07	1.6	31may2000, 03:25	0.21
dique El Cajón	160.15	16.4	31may2000, 04:55	1.21

Figura 24. Tabla resultante para la situación pre fuego (Run_sin fuego) Donde se indica el área de drenaje (km²), el caudal pico (m³/s), el tiempo al pico (h) y el volumen de la lámina escurrida de todos los elementos del modelo.



Referencias:

- Caudal escurrido en el punto de salida de la cuenca del río Dolores.
- - - Caudal escurrido por las subcuencas (Sb) 1,2,3,4,5,6 y 7 que transita por la Sb 8.
- Caudal escurrido por la Sb 8.

Figura 25. Hidrograma de la cuenca del río Dolores para la situación post fuego. Donde se representa gráficamente las descargas instantáneas de un curso de agua en función del tiempo, con un máximo caudal a la salida de la cuenca equivalente a 32.0 m³/s alcanzado a las 4.40 h de iniciado el evento.

Project: tif_SOFIASANCHEZ Simulation Run: Run Post Fuego

Start of Run: 31may2000, 00:00 Basin Model: Cuenca río Dolores
 End of Run: 31may2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 15mar2022, 15:05:52 Control Specifications: Control 1

Show Elements: Volume Units: MM 1000 M3 Sorting:

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SB1	31.27	29.1	31may2000, 02:50	7.60
SB2	27.17	9.3	31may2000, 02:40	2.03
J1	58.44	38.4	31may2000, 02:45	5.01
R1	58.44	35.0	31may2000, 03:15	5.01
SB3	21.61	11.6	31may2000, 02:20	2.88
SB4	3.03	0.4	31may2000, 02:35	0.71
J2	83.08	42.2	31may2000, 03:05	4.30
R2	83.08	39.0	31may2000, 03:40	4.30
SB5	14.56	0.0	31may2000, 00:00	0.00
SB6	8.91	0.7	31may2000, 02:55	0.39
SB7	7.53	1.0	31may2000, 02:20	0.58
J3	114.08	39.4	31may2000, 03:35	3.20
R3	114.08	31.5	31may2000, 04:45	3.20
SB8	46.07	2.4	31may2000, 03:20	0.33
dique El Cajón	160.15	32.0	31may2000, 04:40	2.39

Figura 26. Tabla resultante para la situación post fuego (Run_Post fuego). Donde se indica el área de drenaje (km²), el caudal pico (m³/s), el tiempo al pico (h) y el volumen de la lámina escurrida de todos los elementos del modelo.

5.4. Conclusiones y alcances del modelo

Las tendencias en la escorrentía alcanzaron lo propuesto en las predicciones en relación a los incendios. En la cuenca del río Dolores, la modificación de las coberturas del suelo derivada de los incendios, afectó positivamente a la escorrentía, la cual resultó 2.5 puntos por encima de la condición original (pre-fuego).

El uso de las tablas del SCS-NC y las consideraciones de USDA (2015) y Cerrelli (2005), para el análisis post-fuego, permitieron transformar información cualitativa sobre el tipo de cobertura y el grupo hidrológico de suelo, en información cuantitativa que representa el comportamiento de la escorrentía. Además, para designar el NC final de cada situación, se tuvieron en cuenta los antecedentes a cerca de la capacidad de infiltración en distintos tipos y usos del suelo de la región. Según Karlin et al. (2019), los bosques de las sierras son los ecosistemas con mayor capacidad de infiltración, mientras que en los matorrales y fachinales quemados la infiltración decae aproximadamente a la mitad, respecto a la condición sin fuego.

Se registraron valores medios y altos (sobre todo en la situación post-fuego) del NC en gran parte del territorio, lo que indica la presencia de condiciones que favorecen el proceso de escorrentía por encima de la infiltración. Sin embargo, la elevada heterogeneidad espacial y temporal de los efectos del fuego, hacen difícil una predicción precisa de la escorrentía luego de la ocurrencia de incendios forestales (Shakesby y Doerr, 2006; Moody et al., 2013).

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que la generación de escorrentía puede variar al modificar la intensidad de lluvia, y para este caso fue la misma.

Si bien el modelo resultó útil para el caso de aplicación, debe tenerse en cuenta que el método del SCS, a pesar de sus amplios avances en materia de investigación, aún no ha sido desarrollado lo suficiente en áreas boscosas y de montaña. Los valores de NC para las condiciones de quemado, aún no se conocen lo suficiente (Soulís, 2018), esto se atribuye, en general, a la falta de datos de campo en cuencas boscosas quemadas (NRCS, 2015).

6. Propuestas de manejo

A continuación, se mencionan las recomendaciones generales para sitios quemados y se hace hincapié en el diagnóstico de la vegetación de la cuenca del río Dolores, basados en la caracterización y en la bibliografía mencionada. En términos generales, después de un incendio debe realizarse un diagnóstico general de la situación y en particular, sobre cada comunidad vegetal afectada, en este caso: Bosque, Pastizal, Matorral/Arbustal o campo agrícola. Según la Sociedad Ecológica de Restauración (SER), el diagnóstico implica los siguientes puntos:

- **Determinar la severidad:** Es un indicador cualitativo de los efectos del fuego. Puede estimarse a partir del color de las cenizas, de la profundidad de suelo afectada, signos de escorrentía, rebrote de especies presentes y signos que indiquen altura de las llamas.
- **Evaluar la degradación actual del ecosistema:** Incluye elaboración de un inventario florístico, cuantificación y determinación de renovales, abundancia de especies, grupos funcionales, etc. Además, pueden determinarse otros criterios e Indicadores ambientales, en base a Thompson (Thompson et al., 2013):

Productividad (cantidad de madera).

Biodiversidad (estado del ecosistema, fragmentación).

Alteraciones inusuales (área quemada, frecuencia de fuego).

Funciones protectoras (erosión del suelo, infiltración).

Almacenamiento de Carbono.

Una vez realizado el diagnóstico, se evalúa si es necesaria la restauración o no del ambiente.

6.1. Restauración en zonas incendiadas

En base al diagnóstico de la situación, se puede proponer la restauración del ecosistema. La restauración de un ecosistema es un proceso intencional, que pretende ayudar al restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido (SER, 2004). Se aspira a que el ambiente degradado alcance características de un "ecosistema modelo" que sirve de referencia para planificar un proyecto de restauración ecológica y posteriormente para la evaluación de éste. El ecosistema modelo puede consistir en uno o varios sitios específicos.

La restauración implica una planificación basada en el conocimiento de la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas a restaurar y en las relaciones establecidas entre éstos y los sistemas humanos (Fernandez et al., 2010). La restauración ecológica es una actividad de largo plazo y por consiguiente quienes deben garantizar la continuidad de los proyectos son las poblaciones locales con apoyo de organizaciones locales, municipales, departamentales y nacionales (SER, 2004).

La restauración implica las siguientes fases:

- **Rehabilitación (a corto plazo):** Reparar ciertas funciones del ecosistema y recuperar, al menos, algunas especies originales. La rehabilitación se centra en las especies dominantes, retrasando su acción sobre especies raras y poco comunes. Se busca contrarrestar los efectos negativos inmediatos de escorrentía superficial y la erosión. Para esto se usan diversas estrategias: siembra, fertilización, y aplicación de hydro (hidrogel) y dry mulching, en diversas escalas y con diversas técnicas de aplicación.
- **Restauración (a mediano-largo plazo):** Busca restablecer la estructura y funcionalidad original del ecosistema dañado. Considera la estructura comunitaria, la composición de especies y el restablecimiento de procesos ecológicos a través de un activo programa de modificación del sitio y de reintroducción de especies. Las actividades y por lo tanto los efectos esperados son a mediano y largo plazo.

Las estrategias de recuperación deben estar basadas en el conocimiento de los efectos de los factores tanto bióticos como abióticos en el establecimiento de las plantas (SER, 2004). El objetivo es que la comunidad vaya aumentando su biodiversidad y con ello su estructura y funcionalidad. Para ello será necesario:

1. Conocer las condiciones del área que será restaurada. Las variables a tener en cuenta son: Suelo- Topografía – Hidrología- Estado de comunidades ecológicas- Perturbaciones- Clima y Microclima.
2. Determinar las comunidades potenciales para los distintos hábitats del área a restaurar (ecosistema modelo) y las especies indicadoras de las distintas etapas sucesionales.
3. Preparación del sitio, el manejo del hábitat y la introducción de especies originales (de ser necesario). Una vez que se determinan las especies que se utilizarán para restaurar el área, se debe decidir si se dejará que éstas

colonizen nuevamente el sitio o se reintroducirán directamente usando semillas o plántulas (Dorner y Brown, 2000 en Fernandez et al., 2010). La decisión depende de la severidad del incendio y de las estrategias reproductivas de las especies, así también como de la cercanía de propágulos que permitan la reintroducción (pasiva). Otro modo de reintroducir especies - de manera activa- es a partir de semillas y plántulas, la elección de uno u otro modo será según aspectos técnicos y económicos. Para laderas rocosas se recomienda la hidrosiembra y para sitios inaccesibles siembra aérea.

4. Monitoreo y mantenimiento: visitas mensuales luego de la reintroducción de especies y luego anuales para controlar el proceso de restauración. Las acciones estarán destinadas a riego, control de especies invasoras, control sanitario, herbivoría, reemplazo de especies, etc. Las tareas estarán supeditadas a los recursos disponibles.

Restauración en la cuenca del río Dolores

Cuando los disturbios son leves (severidad de incendio baja/media), la sucesión vegetal puede comenzar a partir de regeneración vegetativa mediante el rebrote de los individuos sobrevivientes. A esto se le llama **restauración pasiva o sucesión natural** y consiste básicamente, en la facultad que todo sistema natural posee de volver a su estado original. Para que este mecanismo sea posible deben eliminarse los factores de degradación y no son necesarias ciertas intervenciones como la resiembra o reforestación (SER, 2004).

En algunos casos la regeneración vegetativa a partir de tocones permite la presencia inmediata de especies propias de etapas sucesionales más avanzadas, acelerando el proceso de auto-restauración, propio de la resiliencia de algunos ecosistemas. Para la región de estudio, se ha comprobado que las especies más importantes del Chaco Serrano, se regeneran a partir de rebrotes de yemas en la base de los troncos (Verzino et al., 2005).

Dependiendo de la especie, ésta tendrá mayor o menor capacidad de recuperarse de un incendio de acuerdo a su vigor, capacidad de diseminación de las semillas y resistencia de las mismas al calor. Algunas especies forestales resistentes al fuego y adaptadas para rebrotar, entre otras, son:

- ✓ Aromito (*Vachellia aroma*) rebrota de corona.
- ✓ Coco (*Fagara coco*), tala (*Celtis ehrenbergiana*) y espinillo (*Vachellia caven*), muestran una evolución favorable en el crecimiento en primeras etapas de la sucesión.
- ✓ Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*) rebrota de cepa.

Para promover la dinámica sucesional natural se recomienda realizar clausuras temporarias para evitar que el ganado disminuya la capacidad del sistema a regenerarse. Diversos estudios han demostrado la capacidad de las especies de las Sierras de Córdoba para regenerarse naturalmente. Algunas de ellas son: *Acalypha communis*, *Cantinoa mutabilis*, *Cyperus rotundus*, *Nothoscordum gracile*, *Parthenium hysterophorus*, *Setaria spp.* y *Sida argentina*, las que presentan buena capacidad de rebrote y germinación debido a su forma de vida terófito, hemicriptófito y geófito (Karlin et al., 2016).

6.2. Prevención y control de incendios

Prevenir un incendio forestal requiere del manejo de infinitas posibilidades y variables que se encuentran fuera del alcance personal/predial. Las tareas a realizar, no debieran ser acciones aisladas, sino más bien, formar parte de un plan de prevención de incendios.

- **Acciones de prevención a campo:** Se detallan algunas de las acciones destinadas a la prevención, de acuerdo a los tipos de coberturas vegetales:
 1. Pastizales: Disminuir la carga de biomasa fácilmente combustible (BFC). Puede realizarse a partir de la introducción de animales o regulación de la carga ganadera, en el caso de que ya existan. Si bien para el área de estudio la Ley de Bosques provincial indica mayoritariamente categoría roja (zona de bosque en alto grado de conservación) y no estaría permitido tal intervención, sería recomendable presentar un plan predial a la autoridad de aplicación de la Ley. Esta actividad sería recomendable para zonas donde la oferta forrajera a la salida del invierno es excesiva, quedando disponible para la propagación de fuegos.
 2. Matorrales y bosque cerrado: En algunas zonas las áreas boscosas han demostrado ser una barrera frente al avance del fuego, además de proporcionar hábitat para las especies afectadas por incendios, siendo importantes a la hora de dispersar propágulos. Sería recomendable determinar áreas de reserva a los fines de conservar y promover la dispersión de especies nativas, muchas con capacidad de regeneración post fuego y adaptadas a la región.
 3. Material seco/ramas caídas: Otra acción destinada a eliminar/disminuir la cantidad de biomasa fácilmente combustible puede ser la recolección de leña.

En todas las áreas se recomienda realizar y mantener picadas corta fuego y limpieza de alambrados; indicado en la Ley 9814. La limpieza de alambrados implica la remoción de pastizales, arbustos y árboles al costado de los mismos.

- **Educación y conciencia ambiental:** Deben incluir una intensa campaña de prevención y lucha contra incendios en épocas de mayor riesgo. La capacitación debiera ser transversal hacia y desde todas las áreas gubernamentales y no exclusiva del área de ambiente o equivalente. Como se ha visto, los incendios son una problemática ambiental y social, que deben ser contenidos por varias disciplinas y distintos ámbitos de gobierno. En esta instancia, es necesario el conocimiento y uso de los instrumentos legales pertinentes como así también, la participación de todas las instituciones y actores de la cuenca. En la instancia de lucha contra incendios, resulta clave la capacitación del personal rural para el control temprano de incendios. La conformación de brigadas a nivel cuenca serían de gran utilidad.
- **Ordenamiento territorial:** La ordenación del territorio es la herramienta conforme a solucionar los problemas de intereses sobre los recursos de la cuenca. Un plan de ordenamiento ambiental del territorio (OAT) implica el desarrollo de varias instancias de planificación y gestión participativas, vinculando los diversos sectores sociales, hacia una organización, a largo plazo, del uso del suelo y ocupación del territorio. Como instrumento legal (Ley Nacional N° 25.675 -General del Ambiente- y Ley Provincial N° 10.208 de Política Ambiental) el OAT especifica un conjunto de intervenciones de pequeña escala y bajo impacto que cumplen, entre otras, las funciones de prevenir incendios, permitir los ingresos, proteger instalaciones y bosques nativos.
- **Mapa de riesgo de incendios:** Un mapa de riesgo abarca las variables y factores intervinientes tanto en la ignición, como en la propagación de incendios. Para ello, se recomienda que sean elaborados a nivel cuenca; como forma de organizar los objetivos, recursos y acciones del plan de prevención.

Los puntos de ignición son sitios o áreas con alto riesgo de que inicie un incendio. Al considerarse a los incendios, como eventos fundamentalmente antrópicos (el 90% de los incendios), se consideran puntos clave, en las sierras, a los caminos y rutas, a los basurales y a los sitios con acceso de peatones.

Los puntos de importancia para la propagación de incendios son las laderas orientadas al norte, por ser las que reciben menor insolación (Giorgis et al., 2013) y, por ende, el material combustible está más propenso a ser quemado, como las laderas con alta pendiente, donde las llamas de fuego se propagan con mayor velocidad.

- **Detección temprana de incendios:** Se recomienda la creación y el uso de un Sistema de Información Geográfico adaptado a cada área/cuenca que aplique productos derivados de satélites como los focos de calor (MODIS y VIIRS), creados para detectar un cambio brusco de temperatura en la superficie de la tierra. Es necesario combinar información meteorológica y ecológica, que brinde información del estado y composición de las coberturas vegetales, como la humedad de los combustibles, a los fines de determinar puntos (geográficos) críticos.

Se recomienda el uso del pronóstico de índice de incendio, Forest Fire Danger Index (FFDI) creado por la CONAE (disponible en <http://meteo.caearte.conae.gov.ar/wrf/fuego.html>). Este índice meteorológico de riesgo de incendio es una versión experimental para el país y está basado en el sistema australiano desarrollado por McArthur. Su utilización a nivel regional, es una herramienta de alerta temprana para la prevención y gestión de incendios forestales para quienes toman decisiones.

7. Consideraciones finales

La caracterización y el diagnóstico de la cuenca del río Dolores-San Marcos (dpto. punilla, Córdoba) permitieron identificar las principales problemáticas socio-ambientales de la región. Se profundizó el estudio sobre las implicancias ambientales y, particularmente, sobre los efectos hidrológicos de los incendios forestales.

En la cuenca del río Dolores (porción sur de la cuenca del río Dolores-San Marcos), los impactos de los incendios sobre la vegetación alteraron los procesos hidrológicos de suelo, modificando los parámetros hídricos de las subcuencas afectadas. Después de los incendios, el caudal pico de escorrentía en el punto de salida de la cuenca se incrementó en un 50%, mientras que el tiempo al pico en los puntos de control se adelantó entre 5 y 15 minutos, según el sitio.

El método del número de curva (NC-NRCS) permitió obtener la capacidad de generar escorrentía en ambas situaciones: pre-fuego y post-fuego. El NC puede utilizarse como un indicador de impacto/degradación ambiental. De todos modos, para facilitar el análisis de la respuesta hidrológica y los esfuerzos de mitigación, todavía es necesario realizar estudios que utilicen datos de los períodos anterior y posterior al incendio y de esta manera ajustar los valores de NC posteriores al incendio. Igualmente, es importante que estos modelos sean validados en el futuro mediante datos de caudales en cuencas afectadas por incendios.

Con la implementación de las prácticas de intervención, en caso de ser necesarias, y de prevención de incendios como las planteadas, se podrían obtener beneficios como: disminución de la escorrentía, mayor acumulación de agua en el perfil del suelo, disminución del riesgo de incendios e inundación. En este sentido, se resalta la necesidad de llevar adelante planes de ordenamiento territorial a nivel municipal y, de la creación y organización de un consorcio y comité a nivel cuenca para la prevención y lucha contra incendios. Todos estos aspectos impactarán de manera directa en los servicios ecosistémicos que provisiona la cuenca y, por ende, en la calidad de vida de la población.

8. Referencias

- Argañaraz, J., Cingolani, A., Bellis, L., y Giorgis, M. (2020). Fire incidence along an elevation gradient in the mountains of central Argentina. *Ecologia Austral*, 30(2), 268–281. <https://doi.org/10.25260/ea.20.30.2.0.1054>
- Argañaraz, J., Landi, M., Bravo, S., Gavier-Pizarro, G., Scavuzzo, C., y Bellis, L. (2016). Estimation of Live Fuel Moisture Content From MODIS Images for Fire Danger Assessment in Southern Gran Chaco. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12), 5339–5349. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2575366>
- Argañaraz, J., Pizarro, G., Zak, M., y Bellis, L. (2015). Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina. *Fire Ecology*, 11(1), 55–73. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1101055>
- Astini, R.A. y Oviedo, N del V. (2014). Cubierta Sedimentaria Mesozoica. Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino: 435 - 471, Córdoba.
- Blarasin M.; Cabrera A.; Matteoda E. (2014). Aguas subterráneas de la Provincia de Córdoba. Río Cuarto: UniRío Editora.
- Blue Marbel Geographics (2016). Global Mapper version 18 [software GIS].
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2000). A guide to restoring a native plant community. En University of Washington, EEUU (p. 59).
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1–4), 28– 61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Bravo, S., Kunst, C., Grau, R. y Aráoz, E. (2010). Fire-rainfall relationships in Argentine Chaco savannas. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1319–1323. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.010>
- Caamaño Nelli, G y Dasso, C. M. (2005). Lluvias de diseño, Conceptos, técnicas y experiencias. Editorial Científica Universitaria Universitas. Córdoba.
- Cabido, M.R. y Zak, M. (1999). *La Vegetación del Norte de Córdoba*. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Recursos Renovables de Córdoba.
- Cabrera, A.L. (1976). Regiones fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería. Tomo II. Acme, Buenos Aires, Argentina.

- Capitanelli, R.G. (1979) Clima. en: Vázquez JB, Miatello RA, E. R (eds) *Geografía física de la provincia de Córdoba* (pp 45–138). Ed. Boldt, Buenos Aires.
- Carignano, C., Kröhling, D., Degiovanni, S., y Cioccale, M. (2014). Geomorfología. In *Relatorio XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba: Córdoba, Asociación Geológica Argentina* (pp. 747-822).
- Carignano, C., Cioccale, M. y Martino, R.D. (2014b). El megadeslizamiento del cerro Uritorco, ladera occidental de la Sierra Chica de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 21–32.
- Cattaneo R., Izeta A., Costa T. (2013). El patrimonio arqueológico de los espacios rurales de la provincia de Córdoba. (6.13), 183 – 200, Córdoba.
- Cattáneo, G. R., Izeta, A. D. y Costa, T. (2015). El patrimonio arqueológico de los espacios rurales de la provincia de Córdoba. Museo de Antropología-IDACOR. Córdoba, Argentina.
- Cerrelli, G.A. (2005). FIRE HYDRO, un método simplificado para predecir descargas máximas para ayudar en el diseño de medidas de protección contra inundaciones para incendios forestales en el oeste. En: Moglen, Glenn E., eds. Actas: Conferencia de gestión de cuencas hidrográficas de 2005: gestión de cuencas hidrográficas para los impactos humanos y naturales: desafíos de ingeniería, ecológicos y económicos; 2005 19-22 de julio; Williamsburg, VA. Alexandria, VA: Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles: 935-941
- Cingolani, A. M., Poca, M., Giorgis, M. A., Vaieretti, M. V., Gurvich, D. E., Whitworth-Hulse, J. I., y Renison, D. (2015). Water provisioning services in a seasonally dry subtropical mountain: Identifying priority landscapes for conservation. *Journal of Hydrology*, 525, 178-187.
- Chow, V. T., Maidment, D.R. y Mays L. (1994). Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill. Colombia.583 pp
- Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988). Applied Hydrology. MCGRAW-HIL, USA.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute, Inc. (2010). ArcGIS [software GIS]. Versión 10.2.
- Estrabou, C. (1983). Relevamiento de variantes fisonómicas de la cuenca La Quebrada. Seminarios I y II, Cátedra de Geobotánica, FCEF y N., Córdoba.
- Evans, T. E. (1971) Hydrological Report. Part I y II. UNDP-FAO-INTA Arg/26. Paraná

- Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gomez, M., y Montenegro, G. (2010). Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales (2010). En L. Olivares y I. Fernandez (Eds.), *Revista chilena de historia natural* (Grafica Lo, Vol. 83, Número 3). <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2010000300014>
- Ferrer-Juliá, M. (2003). Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección, In: CEDEX (Ed.): España.
- Foltz, R.B., Robiochaud, P.R. y Rhee, H. (2009). Una síntesis de tratamientos viales posteriores a incendios para equipos BAER: métodos, efectividad del tratamiento y herramientas de toma de decisiones para la rehabilitación.
- García, C., Piumetto, M., Teich, I., Morales, H., Kindgard, A., Fuentes, M y Ravelo, A. (2018). Mapa de cobertura del suelo de la provincia de Córdoba 2017/2018 - niveles 1 a 3. Recuperado de [https:// idecor-ws.cba.gov.ar/geoserver/idecor/wms](https://idecor-ws.cba.gov.ar/geoserver/idecor/wms).
- Gavier, G. I., y Bucher, E. H. (2004). Deforestación de las Sierras Chicas de Córdoba (Argentina) en el período 1970-1997 (Vol. 101, pp. 1-27). Córdoba: Academia nacional de ciencias.
- Giorgis, M. (2011). Caracterización florística y estructural del Bosque Chaqueño Serrano (Córdoba) en relación a gradientes ambientales y de uso. (Tesis Doctoral). FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 174 p.
- Giorgis, M., Cingolani, A., y Cabido, M. (2013). M. A. Giorgis. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 48, 493–513.
- Giorgis, M. y Tecco, P. (2014). Árboles y arbustos invasores de la Provincia de Córdoba (Argentina): una contribución a la sistematización de bases de datos globales. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 49(4): 581-603.
- Giorgis, M. A., Cingolani, A., Gurvich, D., Tecco, P., Chiapella, J., Chiarini, F., y Cabido, M. (2017). Changes in floristic composition and physiognomy are decoupled along elevation gradients in central Argentina. *Applied Vegetation Science*, 20(4), 558–571.
- Gurvich, D.E., Enrico, L. y Cingolani, A.M. (2005). Linking plant functional traits with post-fire sprouting vigour in woody species in central Argentina. *Austral Ecology*, 30: 789–796. doi: [10.1111/j.1442-9993.2005.01522.x](https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2005.01522.x)
- Hang S.; Negro G.; B A.; Rampoldi A. (2015) Suelos de Córdoba: Variabilidad de las propiedades del horizonte superficial. Oncativo: MAITA. 2015. pag. 90. isbn 978-987-96657-4-9.
- HEC-RAS. (2012). Manuales de usuario disponible en <http://www.hec.usace.army.mil/>

- Herrera, M., Bertrán, M., Galera, F.M., Luti, R. y Menghi M. (1978). Incendio y pastoreo en estepas de altura de las Sierras Chicas de Córdoba. *Ecología*. 3: 95-99.
- Ibáñez J.J., Machado C., Zucarello V. y González Huecas C. (1995). Modelos de simulación y variabilidad espacio temporal. En: Avances sobre el estudio de la erosión hídrica. Ed. Paz González, A. y Taboada Castro, M.T. Universidade Da Coruña. España. 1999.
- IDECOR (Infraestructura de datos Espaciales Córdoba). (2018). Mapa Base Córdoba. <https://www.mapascordoba.gob.ar/>. Ultimo acceso: marzo de 2022.
- INDEC (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Buenos Aires: INDEC
- Karlin, M. S., Arnulphi, S., Alday, A., Bernasconi, J., y Accietto, R. (2016). Revegetación post-incendio en matorrales de *Acacia* spp. en las Sierras de Córdoba, Argentina central. *Oecologia Australis*, 20(4), 464–476. <https://doi.org/10.4257/oeco.2016.2004.06>
- Karlin, S., Bernasconi Salazar, J., Cora, A., Sánchez, S., Arnulphi, S., y Accietto, R. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del suelo*, 37(2).
- Kent K. (1968) A method for estimating volume and rate of runoff in small watershed. USDA SCS.
- Kunst, C. y Bravo, S. (2003). Ecología y régimen de fuego en la región chaqueña argentina. En: Kunst, C. R. et al. (eds.), *Fuego en los ecosistemas Argentinos*, pp. 47-59. INTA, Santiago del Estero, Arg.
- Lal, M.; Mishra, S.K. y Pandey, A. (2015). Verificación física del efecto de las características del terreno y la humedad antecedente en el número de curvas de escurrimiento. *Catena*, 133 , 318-327. doi: 10.1016/j.catena.2015.06.001
- Luti, R., Bertrán de Solís, M., Galera, F.M., Muller de Ferreira, N., Berzal, M., Nores, M., Herrera, M. y Barrera, J.C. (1979). Vegetación. En *Geografía física de la provincia de Córdoba*. Ed. Boldt, Bs. As.
- Martino, R.D. y Guerischi, A. B. (2014). La Estructura Neoproterozoica - Paleozoica Inferior del Complejo Metamórfico de Las Sierras Pampeanas de Córdoba. Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino: 95 - 128, Córdoba.
- Massabié, A. (1982). Geología de los alrededores de Capilla del Monte y San Marcos, Provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 37(2), 153–173.

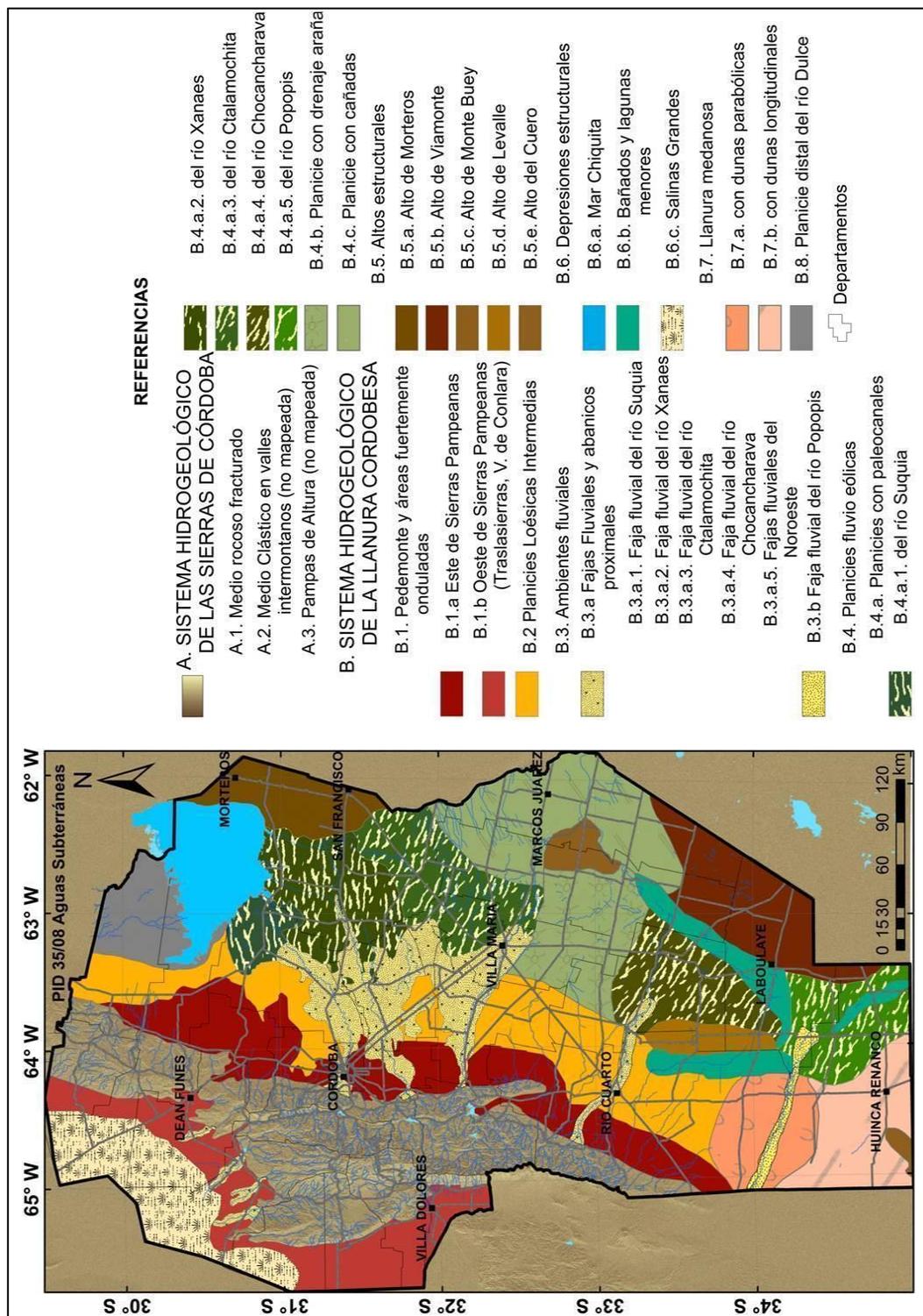
- Massabié, A., Mutti, D. y Nestiero, O. (2002). Edad, afinidades geoquímicas y tectónicas del pórfido riolítico de La Lidia, Sierra Norte de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 57(1), 80–84.
- Miatello, R. A., Roqué, M. E., Racagni, T. L., Oddone, H. B., Capitanelli, R. G., Vázquez, J. B. y Barrera, J. C. (1979). Geografía física de la provincia de Córdoba.
- Miglietta, S. (1994). Patrón de ocurrencia de incendios y su efecto sobre la vegetación en el Bosque Serrano de Córdoba (Tesis de Maestría). FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 60 p
- Mishra, SK, Chaudhary, A., Shrestha, RK, Pandey, A. y Lal, M. (2014). Verificación experimental del efecto de la pendiente y el uso del suelo en el número de la curva de escorrentía SCS. *Gestión de Recursos Hídricos*, 28 (11), 3407-3416.
- Moody, JA, Martin, DA, Haire, SL y Kinner, DA (2008). Vinculación de la respuesta de escorrentía a la gravedad de las quemaduras después de un incendio forestal. *Procesos hidrológicos: una revista internacional*, 22 (13), 2063-2074.
- Moody, JA, Shakesby, RA, Robichaud, PR, Cannon, SH y Martin, DA (2013). Temas de investigación actuales relacionados con la escorrentía y los procesos de erosión posteriores a los incendios forestales. *Earth-Science Reviews*, 122, 10-37.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2004). Hydrologic soil-cover complexes. National engineering handbook: Part 630—*Hydrology*.
- Pastore, F. y Methol, E. (1953). Descripción geológica de la Hoja 19i, Capilla del Monte (Córdoba). Carta geológico-económica de la República Argentina. Escala 1:200.000. Ministerio de Industria y Comercio de la Nación. Buenos Aires, 70 pp.
- Pierson, F. B., Robichaud, P. R., y Spaeth, K. E. (2001). Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed. *Hydrological Processes*, 15(15), 2905– 2916. <https://doi.org/10.1002/hyp.381>
- Psomíadis, E.; Soulis, K.X.; Efthimiou, N. (2020). Uso de SCS-CN y la observación de la Tierra para la evaluación comparativa del efecto hidrológico de los cambios graduales y abruptos de la cobertura terrestre espaciotemporal. *Agua*, 12 ,1386. <https://doi.org/10.3390/w12051386>
- Ramos, V.A. (1999). Las Provincias Geológicas del Territorio Argentino. En: Caminos (ed.) *Geología Argentina*, 29 (3): 41 - 96.
- Robinet, J., Minella, J.P.G., de Barros, C.A.P., Schlesner, A., Lücke, A., Ameijeiras-Mariño, Y., Opfergelt, S., Vanderborght, J. y Govers, G. (2018). Impacts of forest conversion

- and agriculture practices on water pathways in southern Brazil. *Hydrol. Process.* 32, 2304–2317.
- Sánchez, S., Zanvettor, R., Ravelo, A., y Grillii, M. (2021). Impacto de la sequía en los incendios forestales en las Sierras de Córdoba, Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología RADA*, 12, 37–45.
- Sánchez, S., Grilli, M., Karlin, M., Fachinetti, R. y Ravelo, A. (2022). Determinación de regímenes de incendios y sequías usando información satelital y meteorológica para Córdoba, Argentina. *Agriscientia*. En prensa.
- Santos, R.M.B., Sanches Fernandes, L.F., Vítor Cortés, R.M. y Leal Pacheco, F.A. (2019). Impactos hidrológicos de los cambios de uso de suelo en la cuenca del río Sabor: una mirada histórica y perspectivas futuras. *Agua*, 11 (7), 1464.
- Scott, D.F., Versfeld, D.B. y Lesch, W. (1998). Erosión y producción de sedimentos en relación con la forestación y el fuego en las montañas de la Provincia Occidental del Cabo, Sudáfrica. *Diario geográfico sudafricano*, 80 (1), 52-59.
- SER, S. for E. R. I. S. & P. W. G. (2004). The SER International Primer on Ecological Restoration & Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- Sereno R., Apezteguía H. P., Ateca M. R., Bertoni J. C., Esmoriz G. F., Luque R. L., Mendoza Reinoso R. I. y Porcel de Peralta R. (1997). Manual de control de la erosión hídrica. Programa de Evaluación y control de la erosión hídrica. Secretaría de Ciencia y Tecnología – Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
- Shakesby, RA y Doerr, SH (2006). Los incendios forestales como agente hidrológico y geomorfológico. *Earth-Science Reviews*, 74 (3-4), 269-307.
- Silveira, L., Charbonnier, F. y Genta, J.L. (2000). La condición de humedad del suelo antecedente del procedimiento de número de curva. *Revista de ciencias hidrológicas*, 45 (1), 3-12.
- Soil Conservation Service (SCS): National Engineering Handbook. (1972) Section 4. *Hydrology*, US Department of Agriculture.
- Soulis, K.X. (2018). Estimación de la variación del número de curva SCS después de incendios forestales, *Hydrological Sciences Journal*, 63:9, 1332-1346, DOI: 10.1080/02626667.2018.1501482
- Thompson, I. D., Guariguata, M. R., Okabe, K., Bahamondez, C., Nasi, R., Heymell, V., y Sabogal, C. (2013). An operational framework for defining and monitoring forest degradatio. *Ecology and Society*, 18(2). <https://doi.org/10.5751/es-05443-180220>.

- USACE (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. Davis, CA, USA.
- United States Department of Agriculture (USDA). Soil Conservation Service (SCS). (1975). SOIL TAXONOMY. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Handbook N°436. 2º Edición 1999.
- USDA – Natural Resources Conservation Service (2015). DRAFT Technical Note Hydrologic Analyses of Post-Wildfire Conditions.
- Verzino, G., Joseau, J., Dorado, M., Gellert, E., Rodríguez Reartes, S., y Nóbile, R. (2005). Impacto De Los Incendios Sobre La Diversidad Vegetal, Sierras De Cordoba, Argentina. Impact of Fires on Plant Diversity, Sierras of Córdoba, Argentina. *Ecología Aplicada*, 4(1,2), 25–35.
- Zak, M.R, Cabido. M., y Hodgson, J.G. (2004). Do subtropical seasonal forests in the Gran Chaco, Argentina, ¿have a future?. *Biol Conserv* 120:589-598.
- Zilio, A. y Zilio, M. C. (2007). Revalorización del patrimonio geológico como recurso turístico de Capilla del Monte. In IX Jornadas de Investigación del Centro de Investigaciones Geográficas y del Departamento de Geografía. La Plata, Argentina.

9. Anexos

9.1. Anexo 1. Unidades hidrogeológicas de la provincia de Córdoba

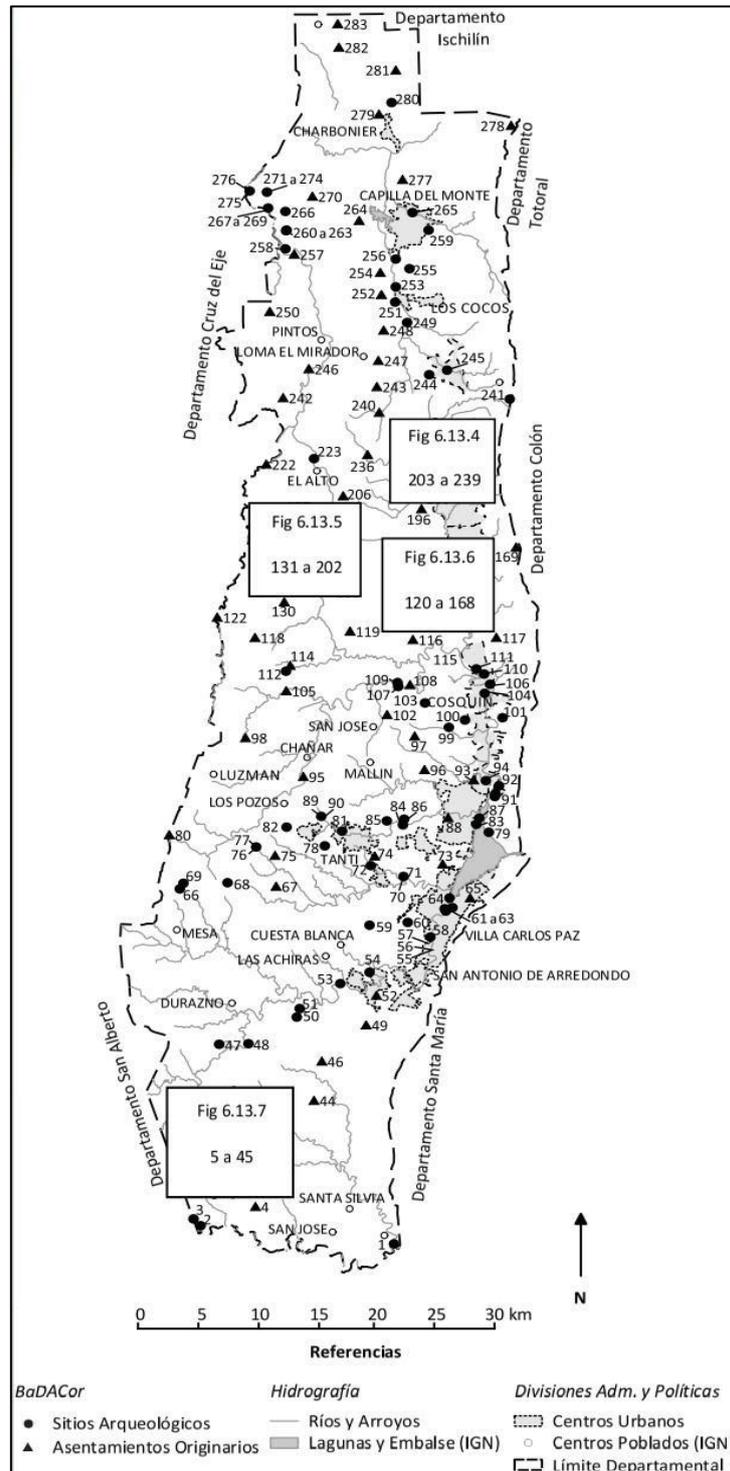


Fuente: Blarasin et al. (2014)

9.2. Anexo 2. Foto del Basural a cielo abierto de Capilla del Monte.



9.3. Anexo 3. Asentamientos Originarios y Sitios Arqueológicos del departamento Punilla



Fuente: Cattaneo et al. (2015).

9.4. Anexo 4. Fotos tomadas en diciembre de 2020 sobre el área de estudio.

Las fotos fueron tomadas sobre la ruta provincial E-17 y zonas aledañas que fueron afectados por incendios en agosto de ese año en el área de estudio (Cuenca del río Dolores-San Marcos).



Fig 1. Vegetación: Bosque Serrano cuatro meses después del incendio.



Fig 3. Rebrote de *Vachellia* spp.

9.5. Anexo 5. Número de Curva del SCS

El Número de Curva (NC) es un parámetro hidrológico que permite caracterizar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica y se determina a partir de algunas características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas, así como por el grupo hidrológico de suelo (NRCS, 2004). Dichos grupos se definen de acuerdo a su potencial de escorrentía, siendo:

Un grupo hidrológico de suelo (GHS) es un conjunto de suelos que tiene similar comportamiento frente a la generación de escorrentía y se clasifica en una de las siguientes categorías:

- Grupo A: son suelos predominantemente arenosos, donde el agua se transmite libremente a través del perfil y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.
- Grupo B: son suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen un potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando están completamente húmedos.
- Grupo C: Son suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas. El potencial de escorrentía es moderadamente alto cuando están húmedos.
- Grupo D: son suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable.

Por otro lado, las condiciones de cobertura en una cuenca se caracterizan a través del tipo de cobertura, la densidad de la vegetación, también llamada condición hidrológica, y el tratamiento del terreno en las zonas de cultivo.

Parte de la Tabla general del Número de Curva del SCS USDA:

Tipo de vegetación	Tratamiento	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Cultivos alineados	R	Pobre	72	81	88	91
	R	Buena	67	78	85	89
	R + CR	Pobre	71	80	87	90
	R + CR	Buena	64	75	82	85
	C	Pobre	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
	C + CR	Buena	64	74	81	85
	C + T	Pobre	66	74	80	82

	C + T	Buena	62	71	78	81
	C + T + CR	Pobre	65	73	79	81
	C + T + CR	Buena	61	70	77	80
Pastizales	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante	-	Pobres	48	67	77	83
	-	Regulares	35	56	70	77
	-	Buenas	≤30	48	65	73
Bosques	-	I Muy pobre	56	75	86	91
	-	II Pobre	46	68	78	84
	-	III Regular	36	60	70	76
	-	IV Buena	26	52	63	69
	-	V Muy buena	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos con firme	-	-	74	84	90	92

Significado de las abreviaturas:

CR=Con cubierta de residuos vegetales que ocupe al menos el 5% de la superficie del suelo durante todo el año
R=Si las labores de la tierra (labrar, gradear, sembrar, etc.) se realizan en línea recta, sin considerar la pendiente del terreno
C=Si el cultivo se realiza siguiendo las curvas de nivel
T=Si se trata de terrenos aterrazados (terrazas abiertas con desagüe para la conservación de suelos