



**UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
Centro Universitario de la Costa Sur
División de Desarrollo Regional**

**INFORME SOBRE LA AVALANCHA DE PIEDRA Y
LODO QUE AFECTÓ A LA COMUNIDAD DE EL
JALOCOTE, MUNICIPIO DE AUTLÁN, JALISCO, EL 25
DE SEPTIEMBRE DE 2023**

Departamento de Ecología y Recursos Naturales

Departamento de Ingenierías

Octubre de 2023

Equipo Técnico (Orden Alfabético)

Integrante del equipo	Aportación/disciplina
Dr. Luis Manuel Martínez Rivera	Integración documento. Hidrología, climatología
Mtro. Pedro Barboza Jiménez	Imágenes de Dron Topográfico
Dr. Oscar Gilberto Cárdenas Hernández	Cartografía, imágenes de satélites
Dra. Faviola Castillo Navarro	Incendios forestales
Dra. Sarahy Contreras Martínez	Biodiversidad
Dr. Peter Rijnaldus Wilhelmus Gerritsen	Sociología, Urbanización
Dr. Demetrio Meza Rodríguez	Modelación hidráulica
Dr. Gerardo Núñez González	Climatología
Dra. Claudia Irene Ortiz Arrona	Vegetación Ribereña

Cuerpos Académicos:

- **Manejo de Recursos Naturales CA-343**
- **Automatización, Robótica y Sistemas Embebidos CA-1067**

Contenido

Resumen ejecutivo	4
I. Introducción.....	6
II. Siniestro ocurrido en la comunidad de El Jalocote, en el municipio de Autlán de Navarro, Jalisco.	7
III. La cuenca del arroyo El Cangrejo: descripción de las condiciones socioambientales.....	7
1. Condiciones físicas de la cuenca.	7
2. La subcuenca de Los Zapotes	9
3. Valores naturales y biodiversidad	10
4. Características sociales y económicas.....	11
5. Estado ecológico de las riberas y vegetación ribereña.....	12
6. Análisis de las causas probables del incidente	14
a. Condiciones meteorológicas del 24-25 de septiembre en el municipio de Autlán de Navarro.....	14
b) Efectos del incendio forestal en Sierra de Cacoma	17
c) Modelación hidráulica de la creciente.....	25
IV. Análisis del probable origen del siniestro ocurrido en el Jalocote.	31
V. Conclusiones	35
VI. Recomendaciones.....	36
1) Monitoreo y Alerta Temprana.....	36
3) Infraestructura de Protección	36
4) Conservación de ecosistemas y restauración ecológica.....	37
6) Control de Erosión	37
7) Coordinación Interinstitucional	38
VII. Bibliografía	39
Anexo 1. Reportajes de la prensa sobre la avalancha de piedra y lodo en el Jalocote	42

Resumen ejecutivo

El informe se centra en el análisis del probable origen de la avalancha de lodo y piedras que tuvo lugar el 25 de septiembre de 2023 en El Jalocote, municipio de Autlán de Navarro, Jalisco, México. Se examinan diversos factores que pudieron ocasionar ese siniestro, como el incendio forestal, las condiciones meteorológicas, la geología y la edafología de la región. El informe concluye que la combinación de un incendio forestal previo, lluvias normales pero persistentes y la falta de vegetación en laderas muy inclinadas contribuyeron a la avalancha de rocas y lodo que afectó gravemente a la comunidad de El Jalocote. A lo largo del informe, se destacan diversas consideraciones y lecciones para la gestión ambiental y la protección de la población en el territorio del municipio.

El incendio forestal que tuvo lugar del 10 al 13 de junio de 2023 se identifica como el principal responsable de la degradación de la zona. Aunque en su mayoría fue de baja intensidad, se observaron áreas de mayor severidad, especialmente en las partes altas de la cuenca. La subcuenca Los Zapotes, que cubre el 73% del área quemada, sigue siendo altamente vulnerable. Este antecedente se considera crucial para comprender la situación.

El evento de lluvia del 25 de septiembre no fue excepcional, con una precipitación máxima de alrededor de 35 mm. Sin embargo, a lo largo de septiembre, se acumularon alrededor de 106 mm de lluvia en la zona. Esta acumulación de humedad saturó los suelos superficiales de las partes altas de la cuenca. La saturación del suelo, combinada con la falta de vegetación debido al incendio, debilitó la estabilidad de las laderas escarpadas. La fuerza de la gravedad provocó una avalancha de rocas y lodo que se desprendió de la parte alta de la cuenca y se descargó en la salida de la subcuenca Los Zapotes, donde se ubica el poblado de El Jalocote. Este material arrastrado estaba compuesto principalmente por rocas angulosas, lo que sugiere que era de reciente desprendimiento.

Se hicieron estimaciones de la crecida del arroyo como resultado de esta avalancha, con un tirante de 2.97 metros, una velocidad del caudal de 5.58 m/s y un caudal estimado de 391 m³/s. Estos datos ilustran la magnitud de la inundación y el peligro al que se enfrentaba la comunidad de El Jalocote.

Se enfatiza que los troncos y ramas arrastrados aguas abajo no provenían de la zona del incendio, sino de la vegetación ribereña que fue removida durante la avalancha. Esto causó una disminución significativa de la cobertura de la vegetación ribereña en la zona rural entre El Jalocote y Ayutita. Además, se observaron modificaciones en la sección transversal del cauce del arroyo debido al arrastre de material pétreo, árboles de las riberas y procesos de erosión de las orillas durante la inundación.

Las viviendas afectadas en El Jalocote no estaban ubicadas directamente en el cauce del arroyo Los Zapotes sino en la llanura de inundación del arroyo, considerada una zona de alto riesgo. La

avalancha depositó rocas y material en esta área debido al cambio de pendiente. Estas condiciones contribuyeron a la magnitud de la devastación en la comunidad.

Se reflexiona sobre la necesidad de tomar medidas preventivas para proteger a la población de eventos naturales impredecibles como terremotos y avalanchas. Aunque estos eventos no se pueden predecir en términos de tiempo y magnitud, sí se pueden implementar medidas de prevención y mitigación.

Se señala que la avalancha ocurrida en el municipio de San Gabriel, Jalisco en 2019 debería haber servido como un punto de inflexión para mejorar las políticas de prevención y protección. Sin embargo, lamentamos que, en lugar de impulsar cambios significativos, solo se observaron más desastres naturales en la región, como inundaciones en Arroyo Seco, en el municipio de Tlajomulco a finales de junio de ese mismo año.

El informe también analiza la evaluación inicial del incendio en El Jalocote, que consideró el incendio en su mayoría de baja intensidad y no tuvo en cuenta la presencia de poblaciones en riesgo. Además, se señala el crecimiento urbano no regulado en zonas de riesgo, lo que ha contribuido a la exposición de la población a riesgos ambientales.

Se hace un llamado a la conciencia sobre la gestión de los recursos y riesgos ambientales. Se destaca la importancia del principio precautorio en la prevención y control de los efectos negativos en la salud humana, en línea con la Carta Mundial de la Naturaleza y el artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. El informe enfatiza la necesidad de políticas públicas efectivas y una regulación adecuada para garantizar la seguridad de la población frente a desastres naturales.

I. Introducción.

La cuenca de El Cangrejo se ubica en la cabecera municipal de Autlán de Navarro. Desde hace varias décadas, ha estado sujeta a transformaciones socioambientales que en su conjunto se caracterizan por una alta complejidad social, ecológica, económica y político-institucional. La urbanización, el manejo de agua y la aplicación de prácticas agroindustriales en la agricultura que ha desplazado las prácticas sustentables de la agricultura familiar y por ende la sustentabilidad agropecuaria, son los factores más importantes que explican esta complejidad (Guerrero de León *et al.*, 2010; Carrillo, 2020; Martínez, 2020).

En este contexto, el proceso de urbanización en el municipio de Autlán se caracteriza por una falta de planeación racional que ha resultado en la ocupación espontánea de zonas anteriormente agrícolas, así como de terrenos federales colindantes a los arroyos. En este sentido, se observa un incremento de un 120% de la superficie urbana en 14 años, principalmente sobre zonas agrícolas y márgenes de los arroyos (Carrillo, 2020; Martínez, 2020). La principal actividad económica es la agricultura y la ganadería en las partes más altas. Sin embargo, estas actividades se enfrentan con varias limitaciones, como son el cambio de uso de suelo y de la vegetación natural, el uso excesivo de agroquímicos y fertilizantes sintéticos que contribuyen a la contaminación de los arroyos (Carrillo, 2020; Martínez, 2020).

Los impactos de las presiones humanas sobre el territorio de la cuenca generan afectaciones a la provisión de los bienes y servicios ambientales, como el mantenimiento de la cantidad y calidad del agua para uso doméstico y otros usos productivos (Martínez, 2020) y problemas de inundaciones en las localidades de las partes bajas de la cuenca (Guerrero de León *et al.*, 2010; Carrillo, 2020). A estos factores socioambientales se suman los efectos locales del cambio climático como la incertidumbre de los patrones de lluvias y el incremento de la temperatura, entre otros (WWF, 2020).

El propósito de este documento es hacer un análisis de la avalancha de lodo y piedras que tuvo lugar el 25 de septiembre de 2023 en El Jalocote, Jalisco, México, sus causas y sus consecuencias, así como emitir una serie de recomendaciones que permitan prevenir en la medida de lo posible las pérdidas humanas y los impactos ambientales y socioeconómicos de este tipo de siniestros no solo en la cuenca El Cangrejo, sino en otras zonas vulnerables de la región.

II. Siniestro ocurrido en la comunidad de El Jalocote, en el municipio de Autlán de Navarro, Jalisco.

En la mañana del 25 de septiembre de 2023, se presentó un deslizamiento de piedra y lodo en la comunidad de El Jalocote, que arrasó con varias viviendas de la comunidad ocasionando pérdidas humanas y materiales, así como daños a la infraestructura de caminos, abastecimiento de agua y viviendas aguas abajo de esta comunidad. Se examinaron detenidamente los informes de las autoridades sobre el incidente a través de medios de comunicación estatales, nacionales e internacionales. Se analizaron los reportajes de Milenio, La Jornada, UdeG TV, METEORED y CNN en español (los cuales se detallan en el anexo adjunto), llegando a las siguientes conclusiones sobre las causas y los daños, tal y como se presentaron en dichos informes.

- “El evento fue causado por una lluvia atípica de 200 mm por metro cuadrado.”
- “Se presentó un desbordamiento de gran cantidad de rocas.”
- “El desbordamiento fue debido a un incendio forestal de 1000 ha ocurrido en el mes de junio de este año, lo que generó el desbordamiento de miles de troncos que saturaron el río.”
- Las viviendas fueron arrasadas por establecerse en la cercanía con el cauce.
- Posterior al incendio ocurrido en la parte alta, no se tomaron las medidas suficientes al clasificar la zona como de baja incidencia de riesgo y no se informó adecuadamente a la población sobre el riesgo potencial.
- “Nueve personas fallecieron y una persona aún se encuentra desaparecida. Un bebé afectado que aún se encuentra hospitalizado.”

III. La cuenca del arroyo El Cangrejo: descripción de las condiciones socioambientales

1. Condiciones físicas de la cuenca.

El arroyo El Cangrejo es un afluente del arroyo El Coajinque, que a su vez descarga en el río Ayuquila. La cuenca del arroyo El Cangrejo está localizada dentro de los límites del municipio de Autlán de Navarro, en la región Sierra de Amula de Jalisco, en las coordenadas $19^{\circ} 45' 48.48''$ a $19^{\circ} 52' 4.78''$ latitud norte y $104^{\circ} 28' 8.00''$ a $104^{\circ} 19' 1.14''$ longitud oeste (Figura 1). Se ubica dentro de la Sierra Madre del Sur como subregión Sierra de Cacoma.

Es una cuenca de tipo exorreica con una superficie aproximada de 91 km^2 , compuesta de corrientes efímeras, intermitentes y perennes (Meza, 2006). La corriente principal es el arroyo El Jalocote - El Cangrejo, cuya longitud es de 23 km, y presenta un gradiente altitudinal que va de los 900 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta los 2400 msnm. Las subcuenca que integran la Cuenca El Cangrejo son Las Iglesias, Los Parajes, Los Zapotes, Los Chiles, Ayutita y Los Ahuilotes

(Figura 1). La parte alta y media está representada por montañas con relieve accidentado, las cuales mantienen conectividad con la Sierra de Manantlán y la Sierra de Cacoma (JIRA, 2017), y planicies en las zonas bajas donde se encuentra la población urbana de la cabecera municipal de Autlán. El clima es cálido con transición a cálido-subhúmedo con una precipitación anual de 900 mm (CEA Jalisco, 2015).

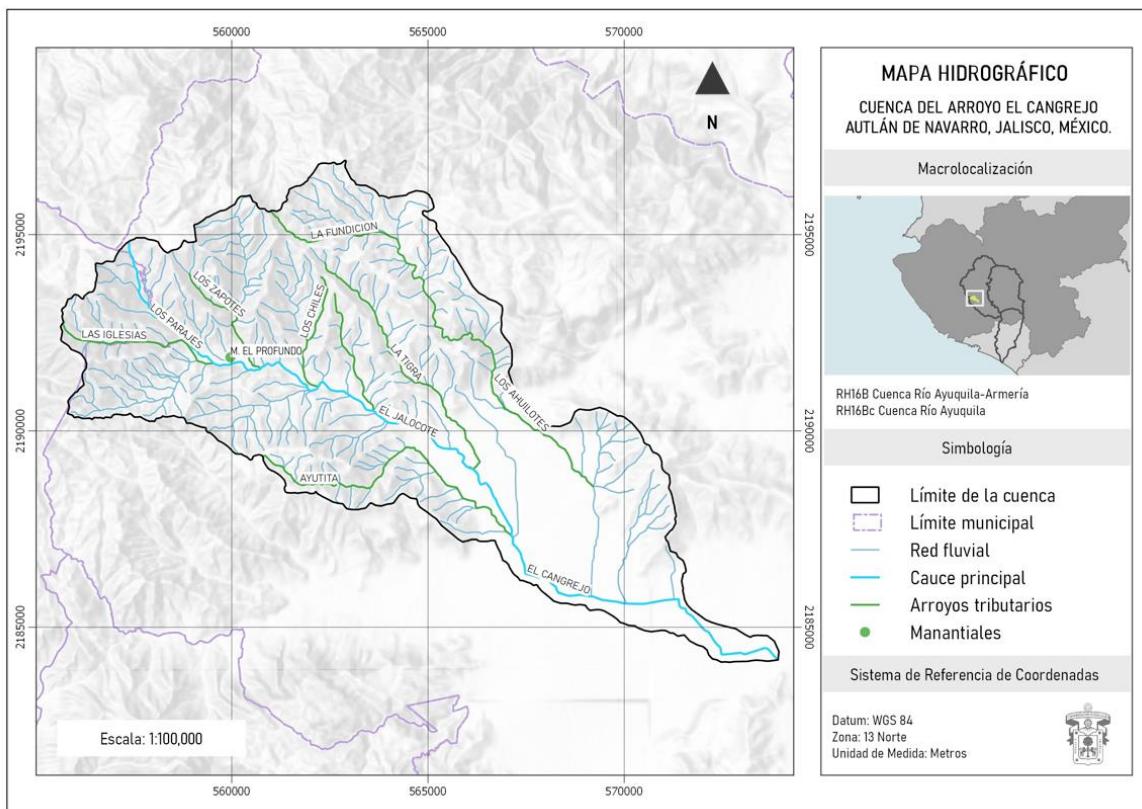


Figura 1. Red fluvial de la cuenca del Arroyo El Cangrejo (Fuente: Martínez, 2020).

La geología del territorio de la cuenca corresponde a rocas ígneas extrusivas, los tipos de suelo predominantes son Regosol y Litosol en la zona alta y laderas de montañas, y Feozem en el valle y la llanura aluvial (JIRA, 2018). Carrillo (2020) ha identificado en la cuenca cuatro tipos de vegetación, siendo el bosque tropical caducifolio (27%) y el bosque de encino (23%) las comunidades de vegetación predominantes (que en conjunto cubren poco más del 50% del territorio de la cuenca). El bosque de pino-encino predomina principalmente en la cabecera de la cuenca, aunque también se distinguen matorrales secundarios (Carrillo, 2020), y la vegetación ribereña que se desarrolla a lo largo de los arroyos que conforman la cuenca. El uso del suelo es

predominantemente agrícola (de riego y temporal), pastizales inducidos, y asentamientos humanos (JICOSUR, 2017; Carillo, 2020).

2. La subcuenca de Los Zapotes

La subcuenca del arroyo Los Zapotes, afluente del arroyo El Cangrejo, es una pequeña cuenca exorreica de solo 651 ha; sin embargo, la pendiente media del cauce principal es de 20.43%, y en la parte alta del cauce es cerca del 70%. Es una cuenca de orden 3 con una pequeña red de drenaje. Sin embargo, su tiempo de concentración (tiempo que tarda el agua en desplazarse desde la parte más alta hasta la salida de la cuenca) es muy rápido, de sólo 25 minutos. La cuenca tiene una pendiente promedio de 57%, pero con valores máximos de 176% (Figura 2).

De acuerdo con el SGM (2007), la cuenca Los Zapotes está constituida en su parte alta por material Volcánico Sedimentario (KaceVs) y en su parte baja por Rocas Ígneas Granito-Granodiorita (KsGrGd). Los suelos son dominados por Regosoles (suelos someros, pobres en materia orgánica, de textura media) en la parte alta y Litosoles (suelos con profundidad menor de 10 cm) y Regosoles en la parte baja.

La comunidad de El Jalocote, comunidad afectada por el deslizamiento de rocas, se encuentra en zona de descarga de la subcuenca Los Zapotes.

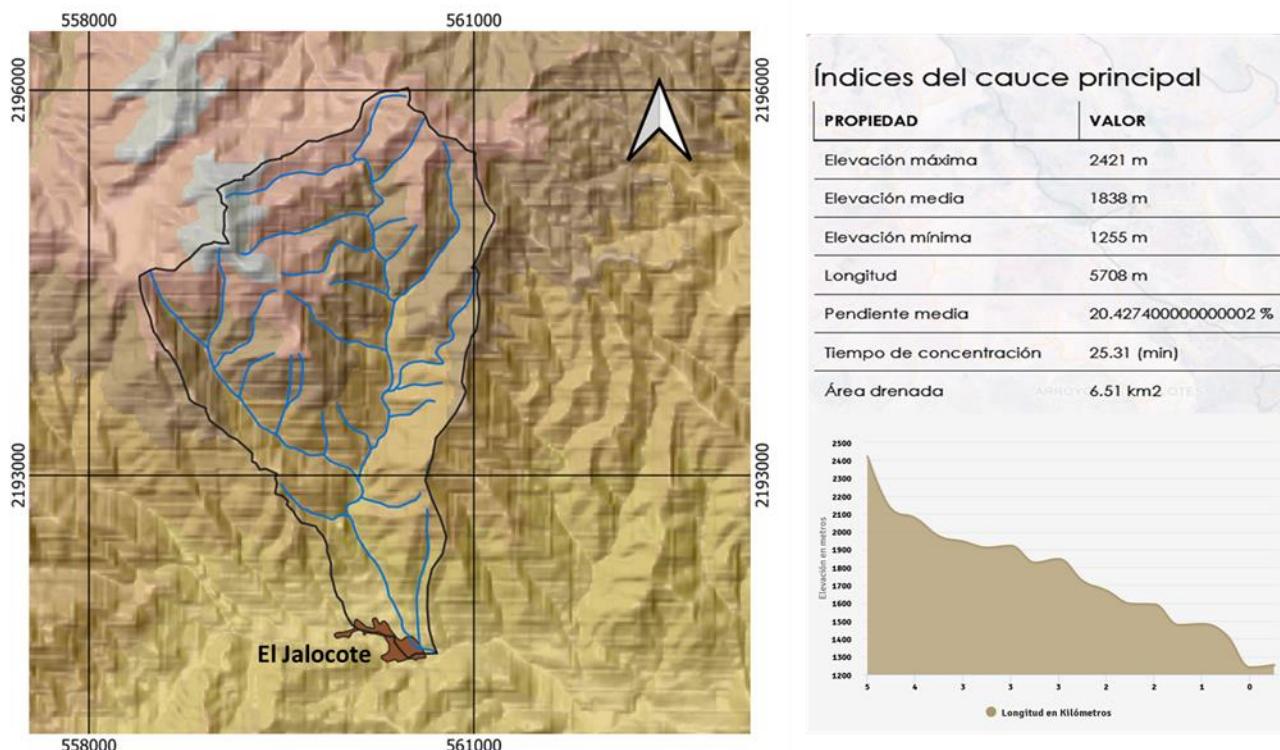


Figura 2. Subcuenca Los Zapotes y sus características geomorfológicas.

3. Valores naturales y biodiversidad

En la Sierra de Cacoma, México, la diversidad biológica es excepcional debido a la coexistencia de componentes de dos regiones biogeográficas y una abundancia de endemismos entre los que destaca *Pinus lumholtzii*, conocido como el "Pino triste", que es endémico del noroeste de México y alcanza su límite de distribución más meridional en esta área. Además, ciertos elementos florísticos propios de la Sierra Madre Occidental llegan aquí a su límite geográfico como en el ámbito genérico, como *Hintonella* (*Hintonella mexicana*), *Microspermum* (*M. debile*), *Omiltemia*, *Peyritschia*, y *Salvia* (Rzedowski 1978).

Es importante resaltar que en la transición selva baja-encinar hay algunos endemismos descritos por primera vez para la cuenca como *Opuntia cetocarpa* y *Solanum edmondoi* (Cuevas-Guzmán, comunicación personal).

Los bosques de pino y encino en la cuenca El Cangrejo se caracterizan por la presencia de árboles caducifolios y perennifolios que alcanzan alturas de 10-30 metros. Entre las especies más comunes se encuentran *P. oocarpa*, *Quercus castanea*, *Q. elliptica*, *Q. praineana* y *Vaccinium stenophyllum*. Otros elementos de los encinares son *Q. calophylla*, y *Q. segoviensis* (Solís, 2019). Además, la diversidad floral incluye *Bejaria aestuans*, *Eysenhardtia platycarpa* y *Xylosma flexuosa*.

El bosque tropical caducifolio, llamado también bosque tropical deciduo o selva baja caducifolia, es uno de los más característicos en la cuenca de El Cangrejo. Se caracteriza por una marcada estacionalidad en su fisonomía, ya que la mayoría de las especies pierden sus hojas en la temporada de estiaje. Entre las especies de árboles distintivos de este tipo de vegetación se encuentran; *Bursera simaruba* y *B. fagaroides*, *Calliandra laevis*, *Cascabela ovata*, *Celtis caudata*, *Guazuma ulmifolia*, *Helicocarpus terebinthinaceus*, *Lysiloma acapulcense*, *Thouinia serrata*, *Trichilia americana*, *Urera caracasana*, *Zanthoxylum caribaeum*, *Prosopis laevigata*, *Albizia tomentosa* y *Stenocereus queretaroensis* (Solís, 2019). Es importante mencionar a *Juniperus flaccida*, conocido localmente como "Jalocote" un elemento interesante en la transición del bosque de pino-encino y el bosque tropical caducifolio, y que da lugar al nombre de la población en la cuenca.

Respecto a la vegetación ribereña, conocida también como bosque de galería, se desarrolla en las margenes del arroyo El Cangrejo y arroyos tributarios. Las condiciones de humedad que mantienen las riberas de los arroyos permiten el desarrollo de una vegetación con hojas siempre verdes, que contrastan con el bosque tropical seco que lo circunda. Algunas de las especies distintivas de este tipo de vegetación en el arroyo El Cangrejo son; *Salix bonplandiana*, *Fraxinus uhdei*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Ficus insipida*, *Guazuma ulmifolia*, *Tabernaemontana tomentosa*, entre otras (Ortiz-Arrona, et al., 2022).

Además, la cuenca sustenta una alta diversidad avifaunística con 211 especies, incluyendo 27 especies endémicas a nuestro país que necesitan protección, entre las que encontramos la Chara de San Blas (*Cyanocorax sanblasianus*), Granatelo Mexicano (*Granatellus venustus*) y Colorín Pecho Naranja (*Passerina lechlanterii*). En esta zona se reproducen un gran número de especies de aves, cuya abundancia aumenta o disminuye dependiendo del tipo de vegetación (López-Aguilar et al., en proceso), por lo que perder un área de aproximadamente 663.5 hectáreas de bosque de pino y encino significa perder cientos de individuos de aves de 10 órdenes, 30 familias y 80 especies, entre las cuales, se encuentran con un mayor grado de vulnerabilidad la Codorniz Coluda Transvolcánica (*Dendrocygna macroura*), endémica a las partes altas de las montañas de México), el Colibrí Garganta Amatista (*Lampornis amethystinus*), la Piranga Cabeza Roja (*Piranga erythrocephala*), especie endémica a las montañas de México y el Vireón Arlequín (*Vireolanius melitophrys*), especie endémica a centro América (Contreras-Martínez, 2017).

4. Características sociales y económicas

Dentro de la cuenca El Cangrejo están ubicadas, al norte, las localidades de El Jalocote, La Lima de los Gómez y Ayutita con 680 habitantes en conjunto (INEGI, 2010), y El Volantín al sur. Las principales actividades económicas en estas zonas son la agricultura, la ganadería y, en menor grado, el comercio (Guerrero-de León et al., 2010). Además, la zona norte forma parte de una ruta turística que conecta la sierra de Cacoma y Talpa de Allende en el estado de Jalisco.

En la parte media se encuentra una parte de la cabecera municipal de Autlán de Navarro (Figura 3). La ciudad está asentada en una llanura aluvial y su cobertura de áreas verdes es escasa, con desarrollo urbano no planeado sobre suelos agrícolas. La población de la cabecera municipal es de 45,380 habitantes y las principales actividades económicas son el comercio, los servicios y la producción agropecuaria de tipo agroindustrial, dependiendo de insumos externos (agroquímicos, fertilizantes sintéticos y paquetes tecnológicos) (JIRA, 2017).

La comparación de la superficie urbana entre los años 2005 y 2019 en la cuenca del arroyo El Cangrejo, delimitadas a través de imágenes de Google Earth (Martínez, 2020), indican que la superficie urbana de la cuenca ha duplicado su tamaño, con un incremento de 120% en un periodo de 14 años (2005-2019), extendiéndose sobre las zonas agrícolas, las laderas de las montañas y las zonas de ribera del arroyo El Cangrejo (Martínez, 2020). La construcción de casas de descanso no ha impactado sobre el servicio del agua, pero sí sobre el ecosistema del arroyo. La urbanización ha sido espontánea y sin planeación adecuada, debido a la inmigración, han proliferado los asentamientos irregulares, afectando la cobertura, continuidad y calidad del servicio del agua. Así mismo, la sobreexplotación del agua, la invasión de las riberas, la modificación del cauce son los impactos de la urbanización con alcance a nivel cuenca.

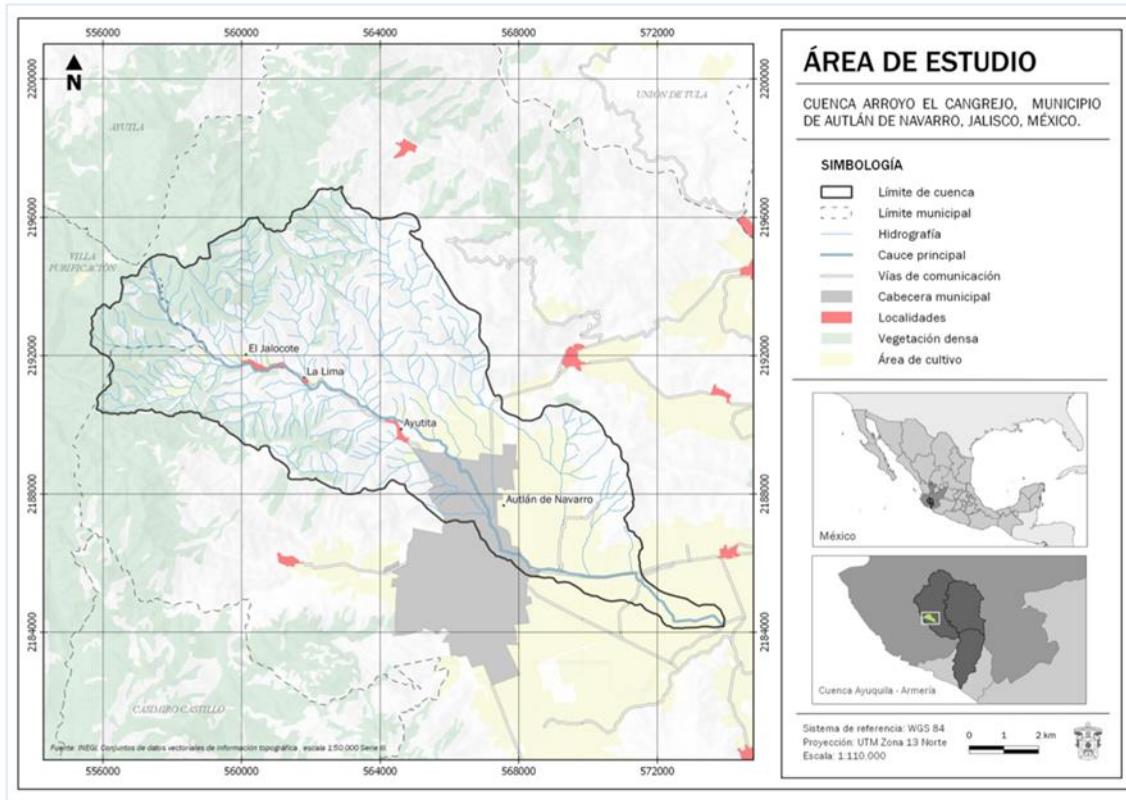


Figura 3. Comunidades y poblaciones ubicadas dentro de la cuenca El Cangrejo (Fuente: Martínez, 2020).

5. Estado ecológico de las riberas y vegetación ribereña

En el arroyo El Cangrejo se tiene información de la calidad ecológica de las riberas, obtenida con la aplicación del Índice de Calidad de las Riberas (RQI - *Riparian Quality Index*) en diferentes tramos del arroyo, representativos de las condiciones hidrológicas y geomorfológicas desde El Jalocote a la zona urbana de Autlán y el valle agrícola en la parte baja de la cuenca (Ortiz-Arrona *et al.*, 2022; Rojas, en proceso). Este índice evaluó la estructura y funcionamiento dinámico de las riberas a través de siete atributos, que caracterizan la estructura y definen la morfología de las riberas y considera como el espacio donde tienen lugar funciones esenciales de los ecosistemas ribereños. (González del Tánago y García de Jalón, 2011). Dan cohesión y estabilidad a las orillas del cauce; actuar como filtro del exceso de nutrientes y contaminantes procedentes de la agricultura; favorecer la infiltración de agua y la recarga de acuíferos mediante sus sistemas radicales, entre otras múltiples funciones y beneficios.

El resultado de la evaluación mostró el siguiente estado ecológico de las riberas: los tramos ubicados en la zona rural hacia la porción media-alta de la cuenca presentaron, en su mayoría, un estado ecológico moderado (valor de RQI: 91 a 99); la zona urbana presentó un estado pobre (valor de RQI: 35 a 62); mientras que los tramos ribereños de la zona agrícola presentaron un mal estado ecológico (valor de RQI: 18-34). Los tramos de ribera urbanos presentaron una mayor alteración en la condición de las orillas, la diversidad de edades y regeneración natural de especies leñosas, y la calidad del sustrato y conectividad vertical, atributos que son indicadores del funcionamiento de las riberas (Figura 4). Ayutita representaba el tramo de referencia con mejor estado ecológico y más cercano al área urbana. Las especies que configuran las riberas del arroyo El Cangrejo en los tramos con moderado a buen estado ecológico fueron: *Salix bonplandiana* (sauce), *Fraxinus uhdei* (fresno), *Enterolobium cyclocarpum* (parota), *Ficus insipida* (higuera), *Guazuma ulmifolia* (guácima), *Pithecellobium dulce* (guamúchil), *Tabernaemontana tomentosa* (huevos de toro), entre otras.

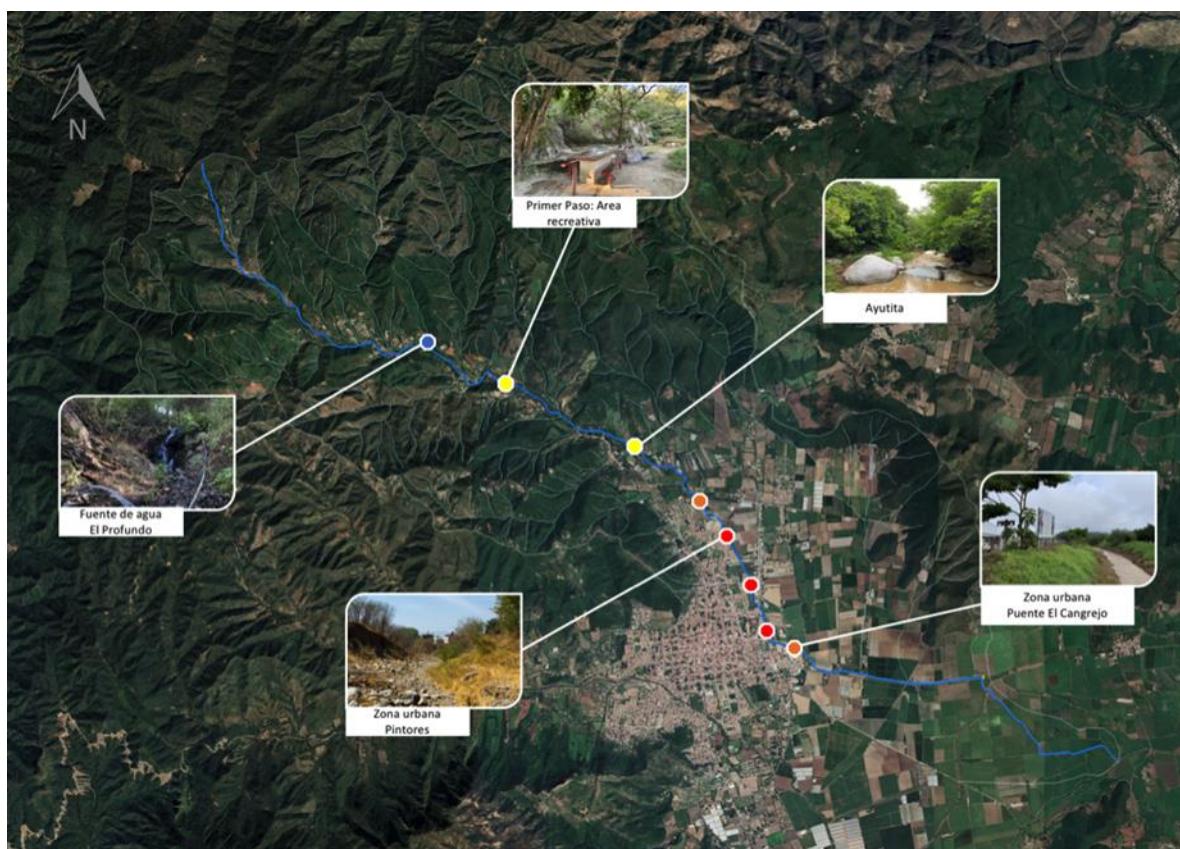


Figura 4. Ubicación de cinco tramos urbanos (círculos en color naranja a rojo), el sitio de referencia del buen estado de las riberas más cercano a la zona urbana (Ayutita), la fuente de agua El Profundo y el sitio recreativo El Primer Paso, en el arroyo El Cangrejo. Los colores de los círculos indican el estado ecológico de las riberas: azul (muy bueno), naranja (moderado), amarillo (pobre) y rojo (mal) (Ortiz-Arrona et al., 2022; Rojas, en proceso).

6. Análisis de las causas probables del incidente

a. Condiciones meteorológicas del 24-25 de septiembre en el municipio de Autlán de Navarro

Para analizar las condiciones meteorológicas presentadas durante los días 24 y 25 de septiembre en el municipio de Autlán y comunidad de El Jalocote, se consultaron tres fuentes de información:

- i. Datos de las estaciones climatológicas del Centro Universitario de la Costa Sur ubicadas en la cabecera municipal.
- ii. Análisis de la precipitación mediante radar de una empresa denominada METEOBLUE que hace una estimación diaria de la probabilidad de precipitación en esta zona.
- iii. El radar del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA.

i. Estaciones climatológicas en Autlán

De acuerdo con datos de seis estaciones climatológicas establecidas en la cabecera municipal por el CUCSUR, el 25 de septiembre se presentaron los siguientes datos de precipitación (Cuadro 1):

Cuadro 1. Distribución de la precipitación en las seis estaciones climatológicas establecidas por el Centro Universitario de la Costa Sur.

Estación	Longitud Oeste	Latitud Norte	Precipitación (mm)	Intensidad máxima (mm/hr)
Est 1	-104.3533	19.76472	4.4	33.6
Est 2	-104.3639	19.77777	4.2	27.7
Est 3	-104.3756	19.76305	7.8	37.7
Est 5	-104.3644	19.78472	0	0
Est 6	-104.3678	19.77888	0	0
Est DERN	-104.3586	19.77454	4.4	12

Los datos de las estaciones del centro de la ciudad hacia la cuenca del Cangrejo presentan una precipitación de alrededor de 4 mm para el evento de lluvia del 25 de septiembre, que tuvo una duración promedio de 30 minutos. La mayor cantidad de precipitación se presentó en el SE de la ciudad de Autlán. La intensidad de lluvia más alta fue de 37.7 mm/hr, lo que se considera como una Intensidad de “Muy Fuerte” (30 -60mm/hr) de acuerdo con el DGCPE (2023). En la figura 5 se puede mostrar la distribución espacial de la lluvia del 25 de septiembre en la ciudad de Autlán, Jalisco.

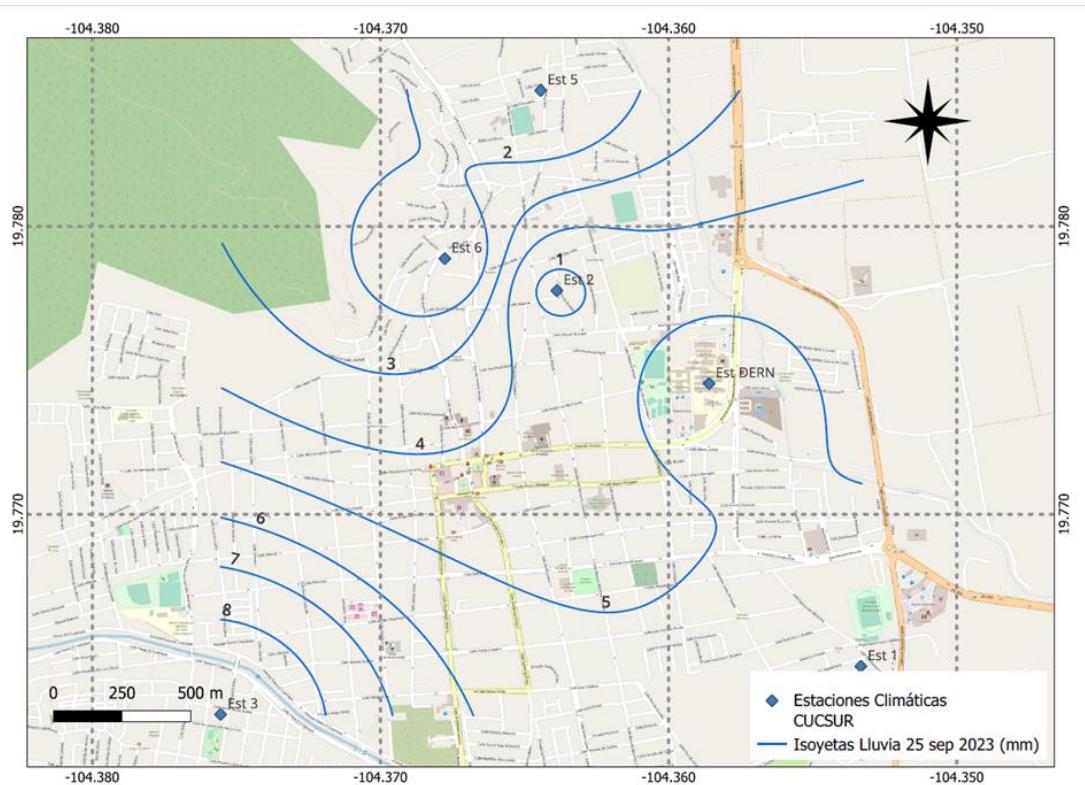


Figura 5. Distribución de la precipitación en la ciudad de Autlán el 25 de septiembre del año en curso.

ii. Servicio Meteorológico de radar de METEOBLUE

De acuerdo con su sitio web, Meteoblue “produce datos meteorológicos de alta calidad (<https://www.meteoblue.com/es/tiempo/mapas/index#coords=4/19.82/-104.42&map=windAnimation~rainbow~auto~10%20m%20above%20gnd~none>) en cualquier punto terrestre o marítimo del mundo. Utiliza tecnología de vanguardia y tecnología para generar, mostrar y distribuir datos meteorológicos. Computa simulación meteorológica propia y modelos con alta resolución. Utiliza Radar y Satélites para este análisis.”

En la figura 6, utilizando las coordenadas de El Jalocote, se aprecian los datos de precipitación para esa zona, aunque es importante considerar que estos datos son para una región de 30 x 30 km. En la gráfica inferior de la figura 6 se puede apreciar que la precipitación en la zona entre los días 24 y 25 de septiembre alcanzó alrededor de 3 a 5 mm de lluvia. Esta estimación la realiza Meteoblue basado en la cobertura de nubes.

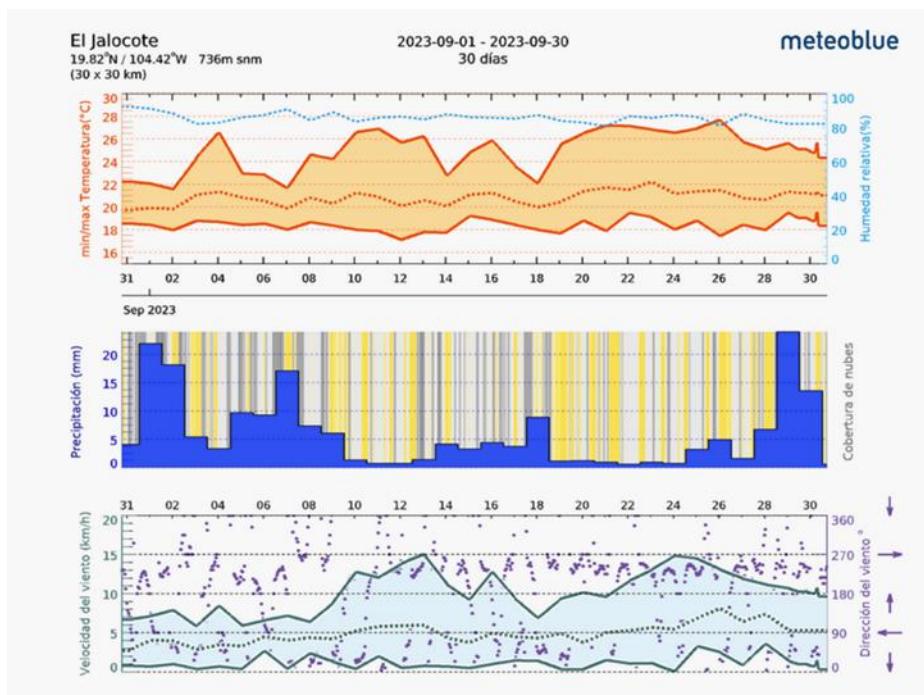


Figura 6. Distribución de precipitación durante el mes de septiembre en la zona del municipio de Autlán de Navarro.

iii. El radar del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA

La precipitación acumulada que reporta el Servicio Meteorológico Nacional para esta zona de la cuenca del Zapote en el poblado de El Jalocote es de 35 mm como máxima (Figura 7 y 8). Las precipitaciones máximas para este día en el país fueron de 61.5 en San Blas Nayarit.

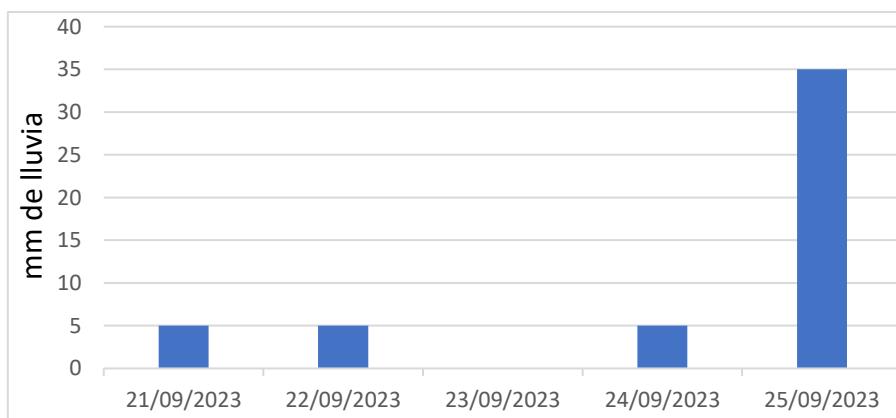


Figura 7. Distribución de la precipitación en la cuenca El Zapote en días previos al 25 de septiembre.

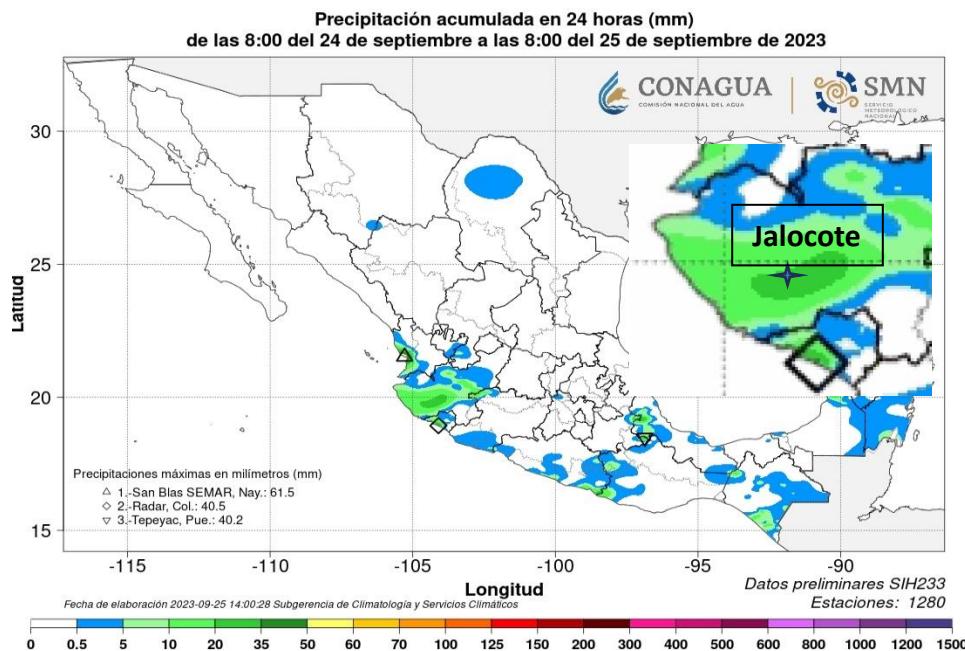


Figura 8. Distribución de la precipitación acumulada en el país, se indica la ubicación de la cuenca Los Zapotes del poblado del Jalocote.

Tanto las estaciones climatológicas ubicadas en la ciudad de Autlán, como la estimación por radar de Meteoblue, son coincidentes con un promedio de 4 mm y 3-5 mm de lluvia respectivamente para el 25 de septiembre de 2023. Sin embargo, dado que en las zonas de montaña hay normalmente más precipitación que en los valles, consideramos que la estimación del Servicio Meteorológico Nacional puede ser la precipitación más cercana que se presentó en la zona con una precipitación máxima de 35 mm. También se podría considerar la intensidad máxima de la lluvia en aproximadamente 38 mm/hr, clasificada como muy fuerte.

b) Efectos del incendio forestal en Sierra de Cacoma

En el año 2023, Jalisco fue clasificado como el estado con el primer lugar en incendios forestales, tanto en número de eventos con 1,306 incendios, como en superficie de 177,626.9 ha (CONAFOR 2023a). El incendio de Cacoma en el municipio de Autlán fue uno de los más grandes de este año, ocupando el lugar número 58 de los 1,305 incendios en el estado por su superficie quemada de 663.5 ha (Figura 9). Se reportan como causas de inicio “Desconocidas”, principalmente afectando bosque de encino, con un impacto mínimo y con un esfuerzo de 499 días/hombre (CONAFOR, 2023b). Por su parte, Protección Civil y Bomberos de Autlán reportan la participación en el incendio de 99 personas de diferentes corporaciones municipales, estatales y federales. Este incendio se desarrolló del 10 al 13 de junio. La figura 10 detalla la extensión del incendio en la zona de Neverías.



Figura 9. Imágenes del incendio de Cacoma (Fuente: Protección Civil y Bomberos Autlán, 2023).

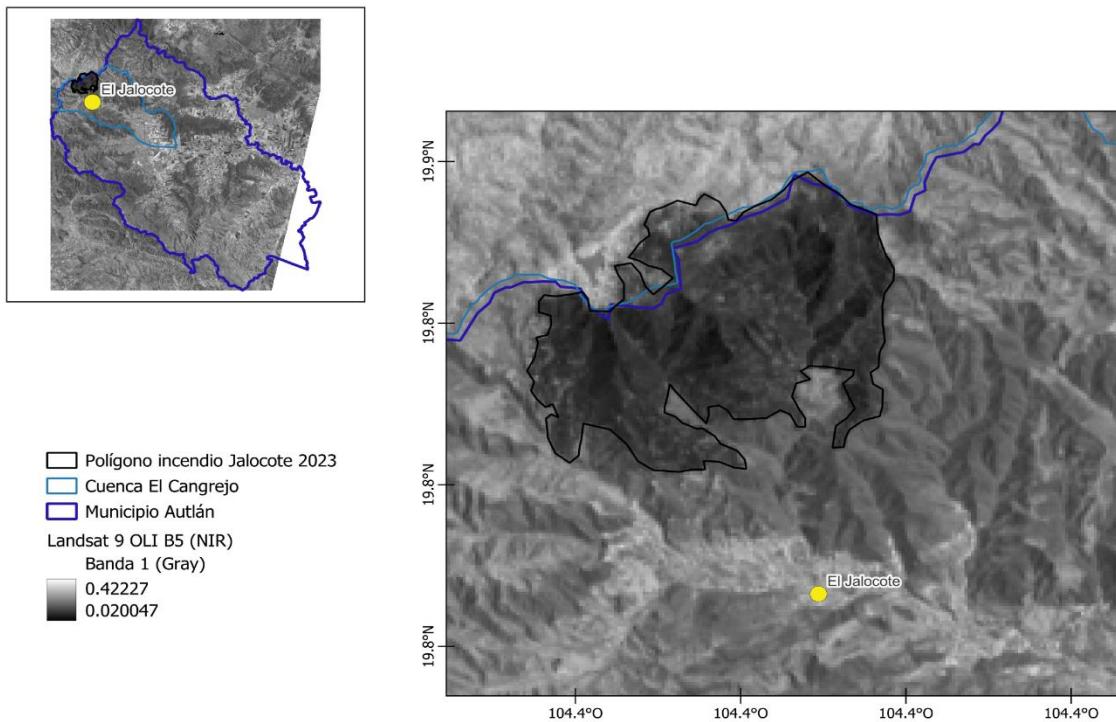


Figura 10. Ubicación del incendio forestal ocurrido en la Sierra de Cacoma.

i. Características del incendio ocurrido en Cacoma (Neverías, subcuenca El Zapote)

Se realizó una caracterización de combustibles en la zona nombrada como Neverías dentro de las coordenadas $19^{\circ}50'54''N - 104^{\circ}27'33''W$, a una altitud de 2180 – 2200 msnm con exposición S-SE. Este trabajo se hizo como parte de la capacitación que reciben los estudiantes de la Ingeniería en Recursos Naturales y Agropecuarios en el curso de Manejo del Fuego. El área se seleccionó buscando satisfacer criterios de capacitación para cubrir los objetivos del curso. En total se muestrearon cuatro sitios de 0.05 ha, cubriendo la variabilidad de combustibles en el bosque de pino-encino. El tipo de suelo predominante es Regosol Eútrico y Dístrico de textura media con componentes rocosos, así como Litosol también de textura media (INEGI, 2023).

La cobertura del sitio es principalmente bosque de pino y encino. El arbolado consiste en pinos (260 individuos por hectárea) y encinos (180 individuos por hectárea) lo que representa una baja densidad (total 550 ind/ha). El bosque se compone de dos estratos: el dosel y el sotobosque. El dosel presenta dominancia de pinos con una altura de 20-25 m, y la base de la copa de 8-12 m, mientras que el sotobosque está mezclado con pinos, encinos, madroños y jalocotes, con una altura de 5-7 m y altura a la base de la copa de 2 m (Figura 11). La distribución de diámetros se encuentra entre 25-70 cm para los árboles dominantes y 2-20 cm para los que se encuentran intermedios (Figura 11). La biomasa sobre el suelo, que comprende el peso seco de la vegetación

viva, en el sitio es de 20-25 ton/ha en general, en las partes altas y arboladas de 30-50 ton/ha y en las partes arbustivas de 10-15 ton/ha (CONAFOR, 2023c).

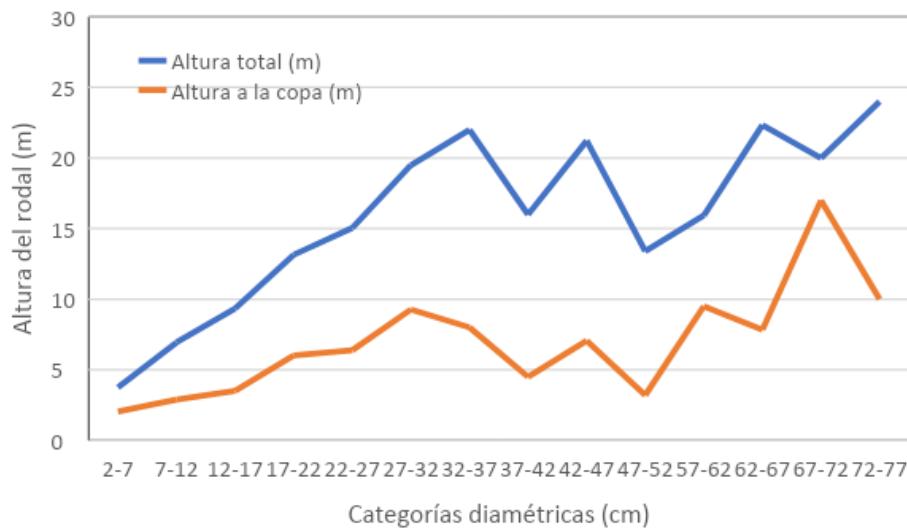


Figura 11. Altura del arbolado distribuido en categorías de diámetro. Se muestra la altura total y la altura a la copa viva, una variable importante para la determinación del potencial de comportamiento del fuego de copa.

Los arbustos incluyen principalmente especies de la familia de las compuestas (4,000 tallos/ha), de las Solanáceas (2,000 tallos/ha) y Salvias (5,000 tallos/ha). La cobertura es de 22% y está compartida con hierbas (17%), pastos (12%) y material leñoso caído (4%) . Su altura es menor a 50 cm y en el caso del material leñoso caído, su profundidad es de 15 cm (Cuadro 2).

La carga de combustibles leñosos en el suelo es de 16.6 Mg ha⁻¹, distribuidos en gruesos (75%), medianos (12.7%) y finos (11.9%) (Cuadro 3). El mantillo presenta cargas de 4.5 Mg ha⁻¹ para la hojarasca de baja densidad (0.14 Mg ha⁻¹ mm⁻¹) y 4.8 Mg ha⁻¹ para la fermentación con mayor densidad aparente (4.86 Mg ha⁻¹ mm⁻¹) (Cuadro 3). El contenido de humedad para ambas capas en octubre de 2021 fue de 100% (Cuadro 3).

Cuadro 2. Estructura del estrato arbustivo y herbáceo. Incluye especies de compuestas, solanáceas, compuestas y helechos, así como el material leñoso caído.

COMPONENTE	ALTURA (cm)	COBERTURA (%)	DENSIDAD (Ind/ha)
ARBUSTOS	36	22	5,500
HIERBAS	31	18	ND
PASTOS	25	12	ND
M. LEÑOSO CAÍDO	15	4	2,100 piezas

Cuadro 3. Características de los combustibles del suelo. Mientras mayor la carga, menor la densidad y menor la humedad, mayor disponibilidad para la combustión durante un incendio forestal.

TIPO	CARGA (Mg ha ⁻¹)	PROFUNDIDAD (cm)	DENSIDAD APARENTE (Mg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
FINO	1.98	ND	ND	ND
MEDIANO	2.11	ND	ND	ND
GRUESO	12.5	15.8	ND	ND
HOJARASCA	4.50	37.7	0.14	99.2
FERMENTACIÓN	4.80	28.6	4.86	99.4

ii. Simulación del comportamiento del fuego del incendio de Sierra de Cacoma.

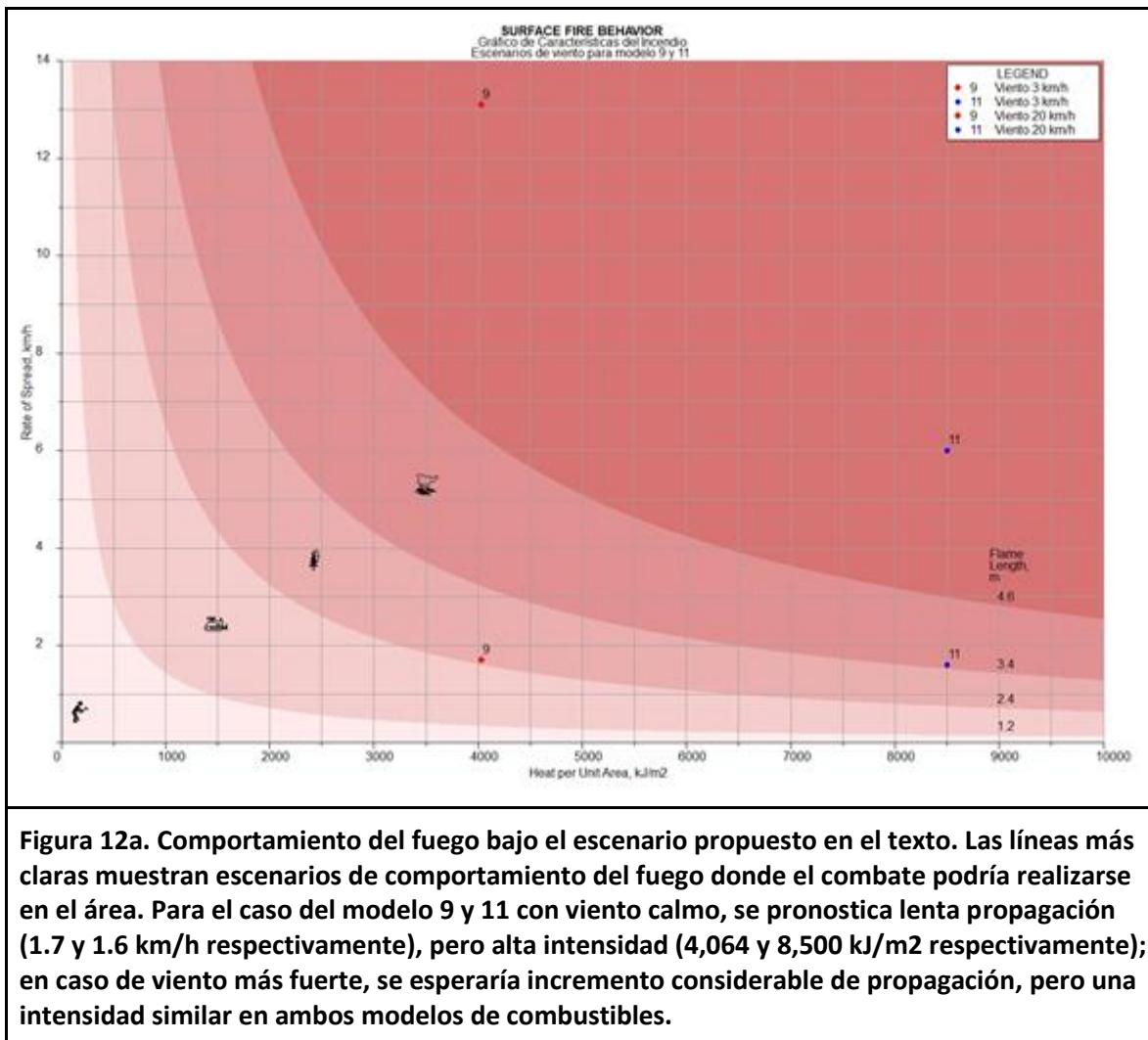
Para determinar el comportamiento potencial del fuego, es necesario identificar el combustible que contribuye principalmente a la propagación y a la intensidad, para lo cual se proponen los modelos de combustibles básicos de Anderson (1982). Con base en la información recabada en los sitios de muestreo, se determinó que el modelo 9 (bosque de coníferas con acículas grandes) y el modelo 11 (bosque de coníferas con latifoliadas y material leñoso caído mediano) representan las condiciones combustibles observadas. Para realizar la simulación, es necesario ingresar datos relacionados con las condiciones ambientales predominantes. En el caso propuesto se seleccionaron las observadas durante los días en los que ocurrió el incendio (observación personal):

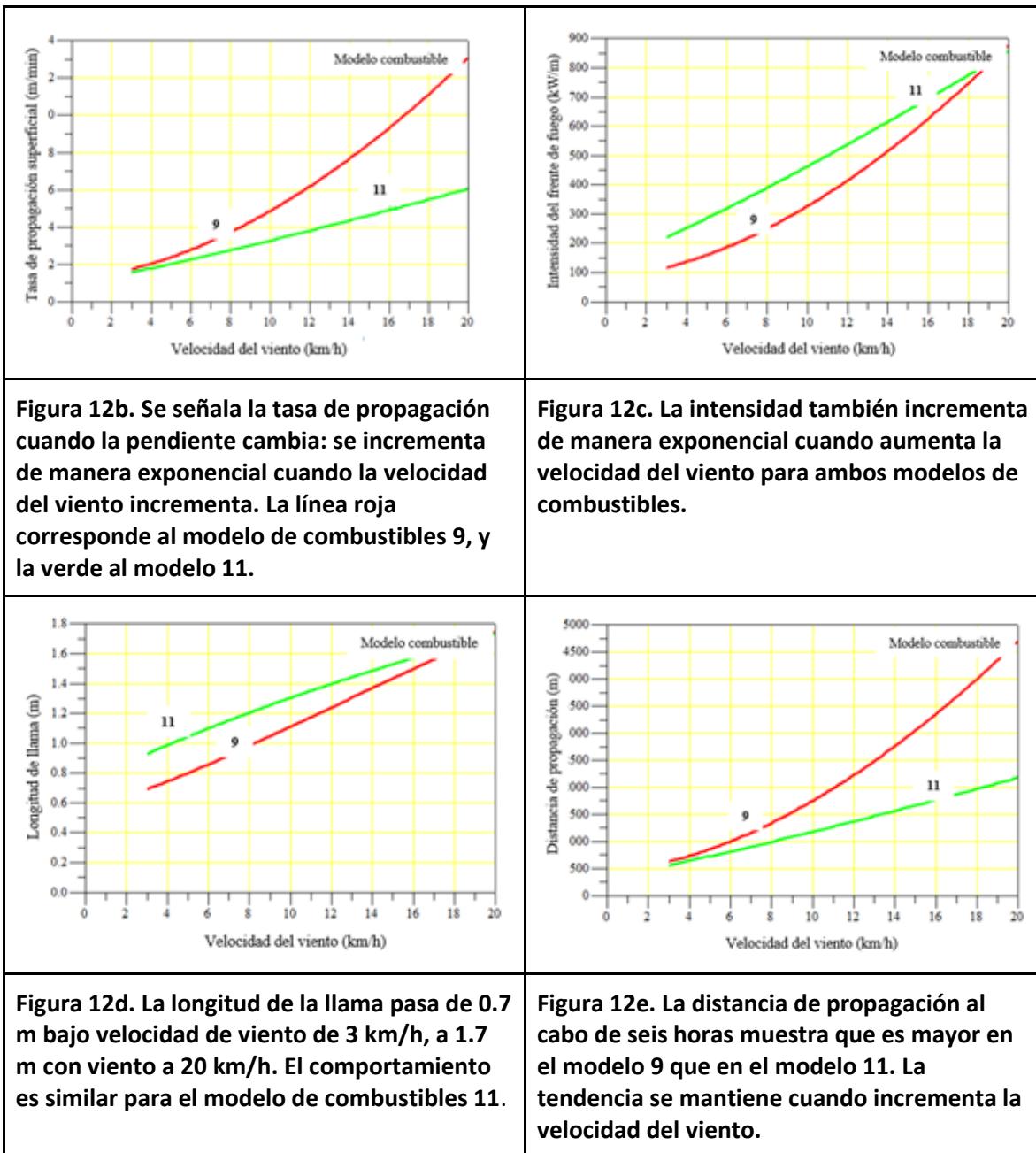
- Temperatura 33°C
- Viento 3-5 km/h con rachas de 20 km/h con dirección SW
- Humedad relativa entre 40 – 60%
- Pendiente de 30 – 50%
- Materia orgánica viva completamente seca

Para simular el comportamiento del fuego se utilizó el software Behave Plus 6.0.0 (Andrews, *et al.* 2005) y Fire Characteristics Charts v. 2.1.3 (Heinsch y Andrews, 2010), con lo que se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 12^{a,b,c,d} y e):

- Tasa de propagación: 0.06 km/h
- Tiempo de residencia: 0.2 min
- Intensidad de la reacción: 434 kW/m²

- Calor por unidad de área: 4,064 kJ/m²
- Intensidad: 66 kw/m
- Altura de la llama: 0.5 m
- Tamaño del incendio después de 6 horas: 8 ha
- Comportamiento del fuego: superficial de baja intensidad





El comportamiento potencial del fuego, de acuerdo con las características observadas en el área de muestreo, indican un incendio de baja intensidad superficial y que se propaga lentamente. Sin embargo, durante el incendio se observó un comportamiento de alta intensidad (Figura 9) en las partes altas donde el pino de diámetros pequeños (< 20 cm) predominaba y con pendientes mayores a 50%. Las condiciones del incendio los días del 10 al 13 de junio de 2023 fueron favorables para un comportamiento más intenso que el pronosticado: temperaturas mayores a

32°C, humedad relativa menor a 20%, vientos con rachas de 20 km/h en promedio, y tiempo desde la última precipitación de ocho meses o más.

Los modelos empleados para la simulación corresponden solamente a las características combustibles de los parteaguas y laderas altas del polígono del incendio; se conoce que en la frontera agropecuaria/urbana, el modelo de combustible estaría más relacionado con elementos pastizales y matorrales (modelos 1 y 4 respectivamente).

iii. Impacto del incendio de Cacoma (Neverías).

El comportamiento del fuego en el incendio de Neverías en junio de 2023 se categorizó como de baja intensidad y superficial por las autoridades estatales (Cuadro 4). Sin embargo, observando la severidad en imágenes de satélite, se puede inferir que hubo comportamiento intenso en algunas zonas dentro del polígono, sobre todo aquellas que corresponden a las partes altas de los parteaguas de la cuenca. Esto pudo haberse suscitado debido a que el fuego se propagó pendiente arriba, chocando con el contrafuego iniciado como estrategia de combate por el personal encargado del incidente, con fines de salvaguardar la integridad de los recursos al otro lado del parteaguas y la de los brigadistas en combate. Con los datos obtenidos no se puede corroborar con certeza el grado al que el incendio contribuyó al evento de la avalancha suscitada el 25 de septiembre. Lo que se puede confirmar es que se pudo haber generado mortalidad en el arbolado sobre todo en las zonas de alta severidad (Figura 13), pero debido a la baja densidad de tallos y a la ausencia de huellas de carbón en la palizada encontrada en el margen del arroyo El Jalocote, se puede deducir que la contribución de la severidad del incendio no estuvo relacionada con el arrastre de troncos, pero si con el escurreimiento presentado y con el debilitamiento de la estabilidad de la capa de suelo y rocas, que fueron movidos por gravedad en la avalancha presentada.

Cuadro 4. Distribución de severidad del incendio (Fuente: SEMADET, 2023).

SEVERIDAD	SUPERFICIE (ha)	Porcentaje
Baja	329.2	50.47
Baja a Moderada Severidad	305.98	46.9
Moderada a Alta Severidad	15.8	2.4
Alta Severidad	1.2	0.2

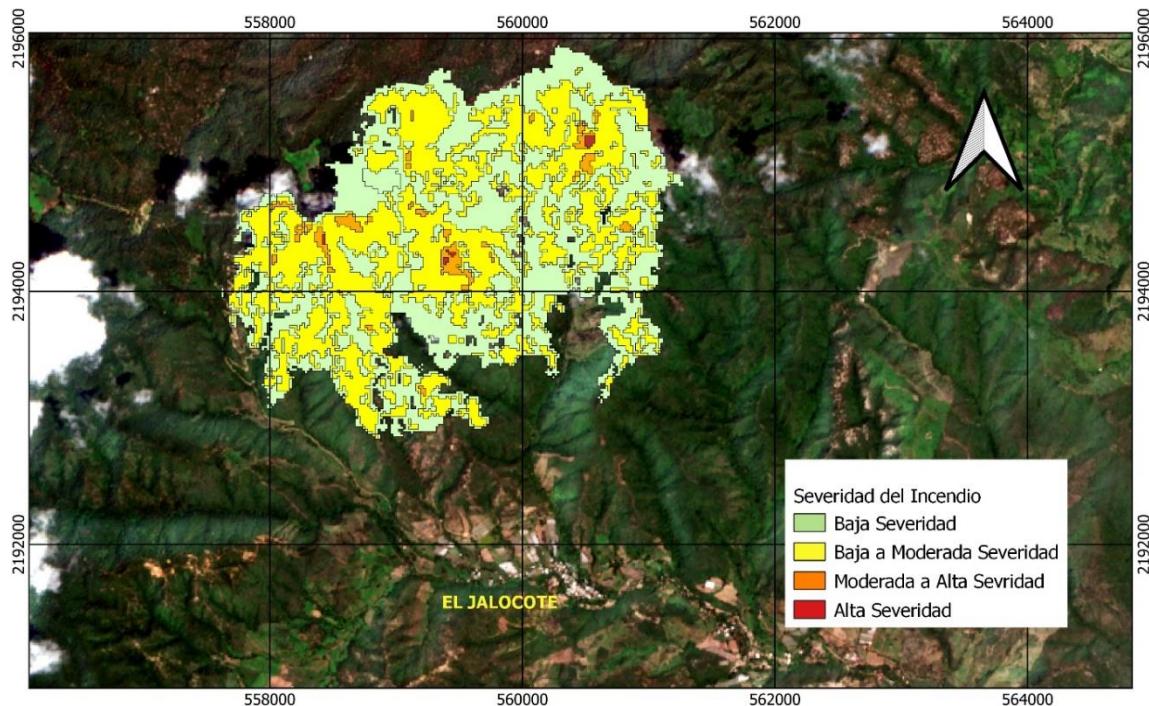


Figura 13. Distribución de la severidad del incendio.

c) Modelación hidráulica de la creciente.

Para modelar la hidráulica de arroyo El Cangrejo y estimar la velocidad y caudal estimado presentado en la avalancha en el sitio El Jalocote, fue necesario realizar un levantamiento topográfico utilizando un Dron Phantom 4 con estación móvil RTK con receptor GNSS que es compatible con todos los principales sistemas de navegación por satélite con una cámara 1" CMOS Píxeles efectivos: 20 MP (Figura 14).



Figura 14. Dron Phantom 4 y estación móvil RTK.

Las imágenes obtenidas del levantamiento se descargaron y fueron operadas con en el software Agisoft Metashape Professional para su procesamiento, dicho procesamiento contó con el soporte de un equipo de cómputo robusto para realizar el análisis.

Se levantaron aproximadamente 640 metros de la corriente del arroyo con una resolución de imagen de 0.02 metros (Figura 15), y se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución en píxel de 0.09 metros (Figura 16).

Para determinar el perfil hidráulico o huella máxima de la corriente del arroyo fue necesario determinar tres secciones transversales al arroyo, la primera sección ante de llegar a la comunidad El Jalocote, la segunda dentro de la localidad El Jalocote y la tercera a la salida de la localidad El Jalocote, en la figura 17 se muestran las secciones transversales seleccionadas para el modelamiento hidráulico.

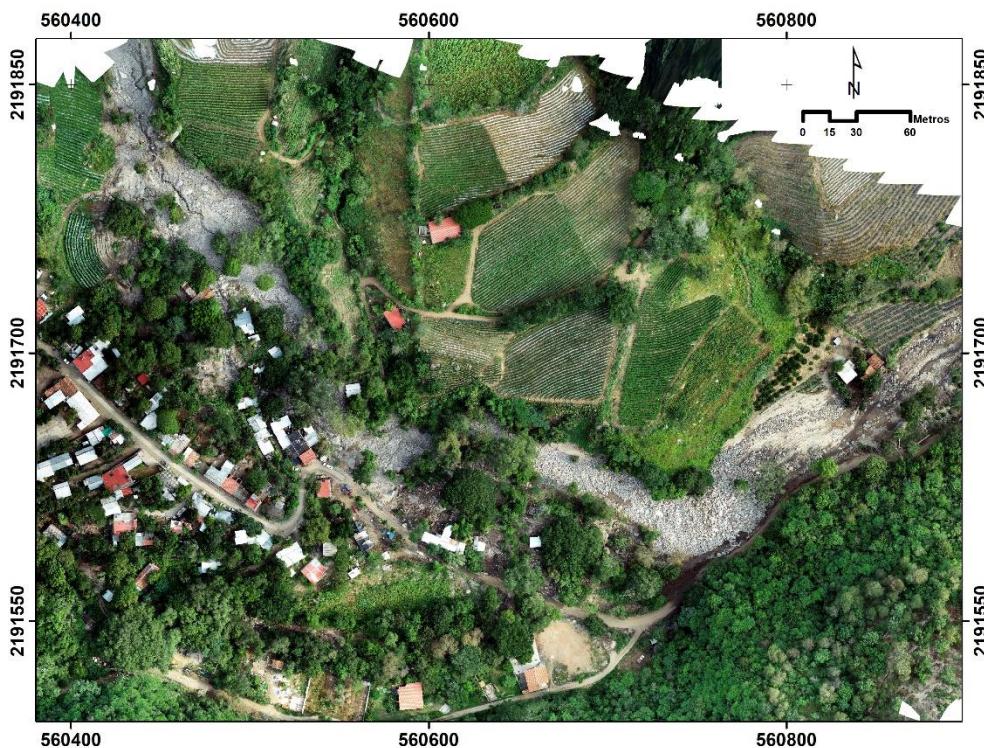


Figura 15. Ortomosaico de la comunidad El Jalocote.

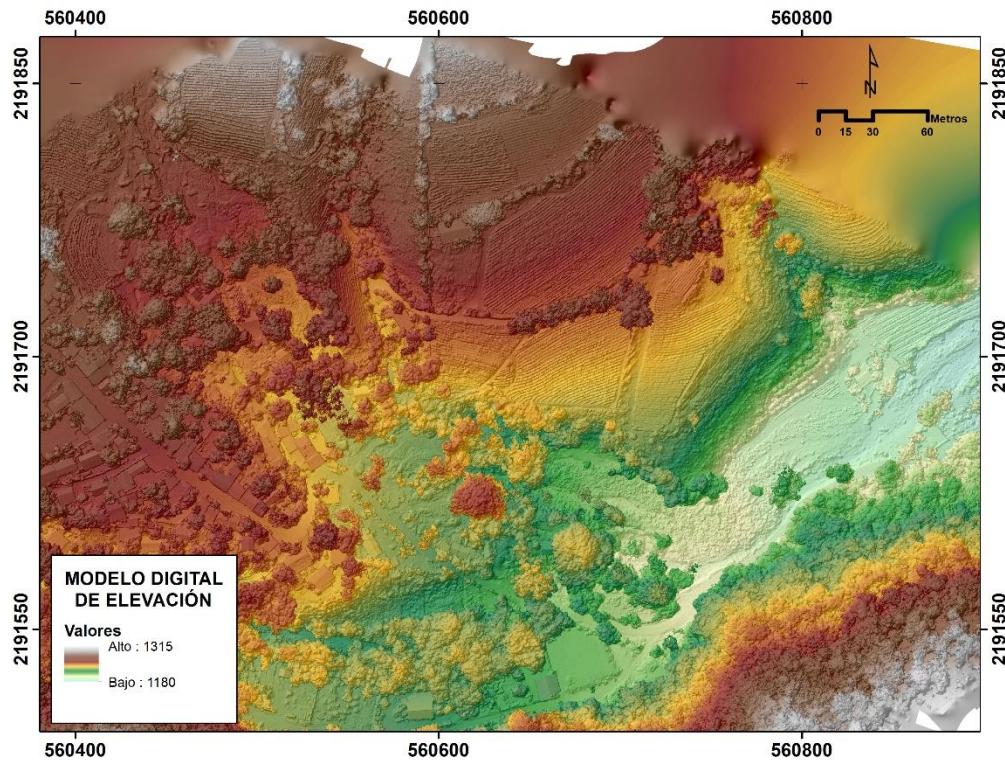


Figura 16. Modelo Digital de Elevación de la comunidad El Jalocote.

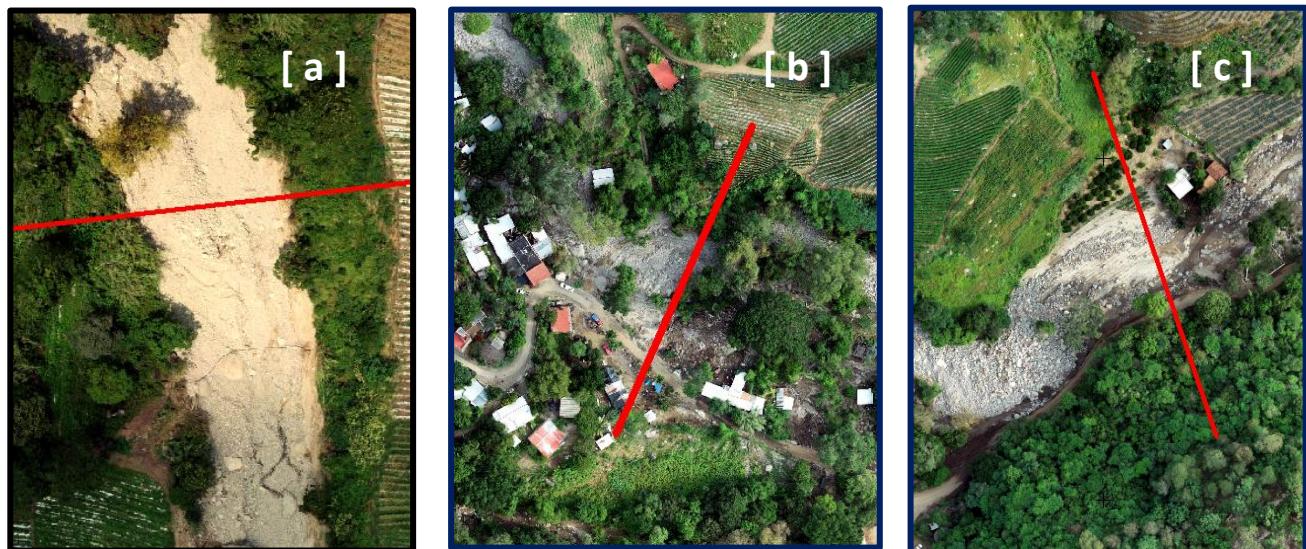


Figura 17. Secciones transversales en la corriente del Arroyo El Cangrejo para simulación hidráulica (perímetro mojado): (a) antes El Jalocote, (b) El Jalocote, y (c) después El Jalocote.

Para determinar el caudal en las secciones transversales fue necesario estimar primero la velocidad de agua que se desplazó en la avalancha. Para calcular la velocidad del agua se empleó la fórmula de Manning (Chow, 1959) la expresión algebraica de la fórmula de Manning es:

$$V = 1/n R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde V es la velocidad de escurrimiento (m/s), n es el coeficiente de rugosidad, R es el radio hidráulico (m) y S es la pendiente hidráulica se expresa en forma decimal.

El coeficiente de rugosidad de Manning se utiliza en la ecuación de Manning para calcular el flujo en canales abiertos (Chow, 1959). Para definir este valor adimensional se utilizó la Guía para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning para canales abiertos y llanuras aluviales (Arcement y Schneider, 1989).

La pendiente fue determinada mediante la información del Modelo Digital de Elevación con una resolución de 0.09 m con una distancia aproximada a los 300 metros en cada sección transversal. El perímetro mojado de un conducto es la porción del perímetro donde la pared está en contacto con el fluido (excluida la superficie libre del líquido).

El radio hidráulico es el cociente entre la sección por donde circula el fluido y el perímetro mojado. Este radio se emplea en el cálculo de pérdidas de carga en la fórmula de Manning. La ecuación para calcular el radio hidráulico es: $R = A / P$ donde: A = área de la sección de la corriente y P es el perímetro mojado.

El área de la sección de la corriente estima, el área mojada del perfil transversal utiliza la siguiente expresión:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

El perímetro mojado se expresa de la siguiente forma:

$$P = \sum_{i=0}^{\infty} l_i$$

donde l_i es la longitud de cada superficie en contacto con el cuerpo acuoso.

Finalmente, para estimar el caudal máximo se utiliza la siguiente formula:

$$Q = A V$$

Donde: A es el área moja m^2 , V es la velocidad del escurrimiento (m/s) y Q es el caudal ($m^3/s.$)

Resultados del perfil hidráulico

El primer resultado muestra la sección transversal antes de llegar a la localidad El Jalocote, se estimó una elevación de la lámina de agua con respecto al nivel del mar de 1291.2 metros, la pendiente estimada fue de 0.080 metros y un coeficiente de rugosidad adimensional de Manning de 0.065. Con estos valores se obtuvo un caudal promedio de $387.88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con una velocidad de 6.2 m s^{-1} , con un tirante medio de 2.76 metros, el perímetro mojado de la sección fue de 37.53 metros, con un área mojada de 63.03 m^2 y un radio hidráulico de 1.68 metros (Figura 18).

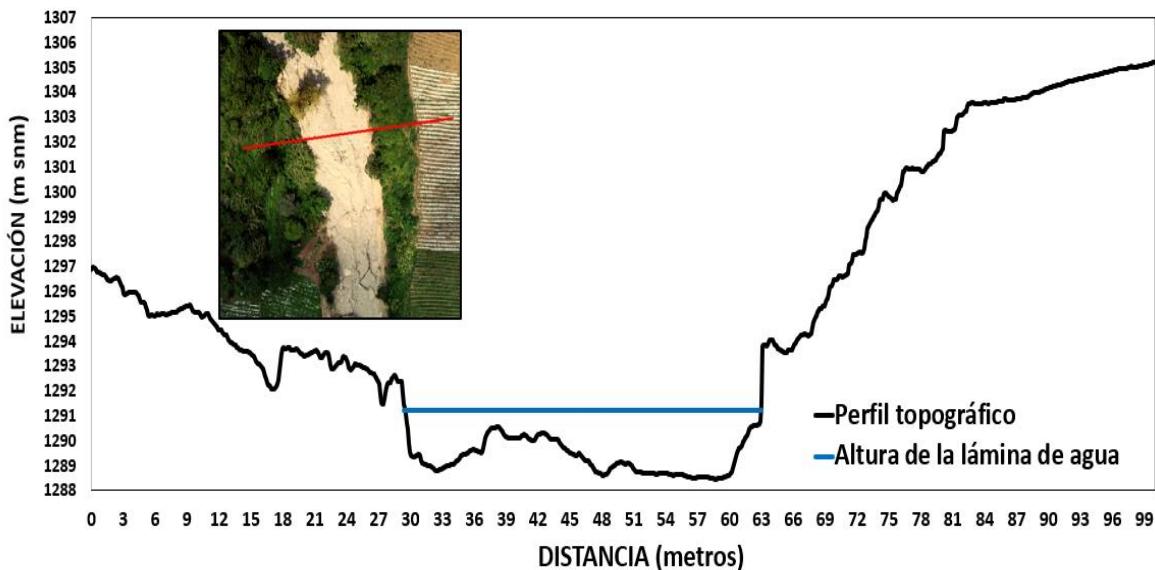


Figura 18. Perfil hidráulico transversal de la sección antes El Jalocote.

El resultado de la segunda sección transversal dentro de la localidad El Jalocote muestra una elevación de la lámina de agua con respecto al nivel del mar de 1238.5 metros, la pendiente estimada fue de 0.090 metros y un coeficiente de rugosidad adimensional de Manning de 0.075. Con estos valores se obtuvo un caudal promedio de $390.48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con una velocidad de 4.43 m s^{-1} , con un tirante medio de 3.02 metros, el perímetro mojado de la sección fue de 75.47 metros, con un área mojada de 88.07 m^2 y un radio hidráulico de 1.17 metros (Figura 19).

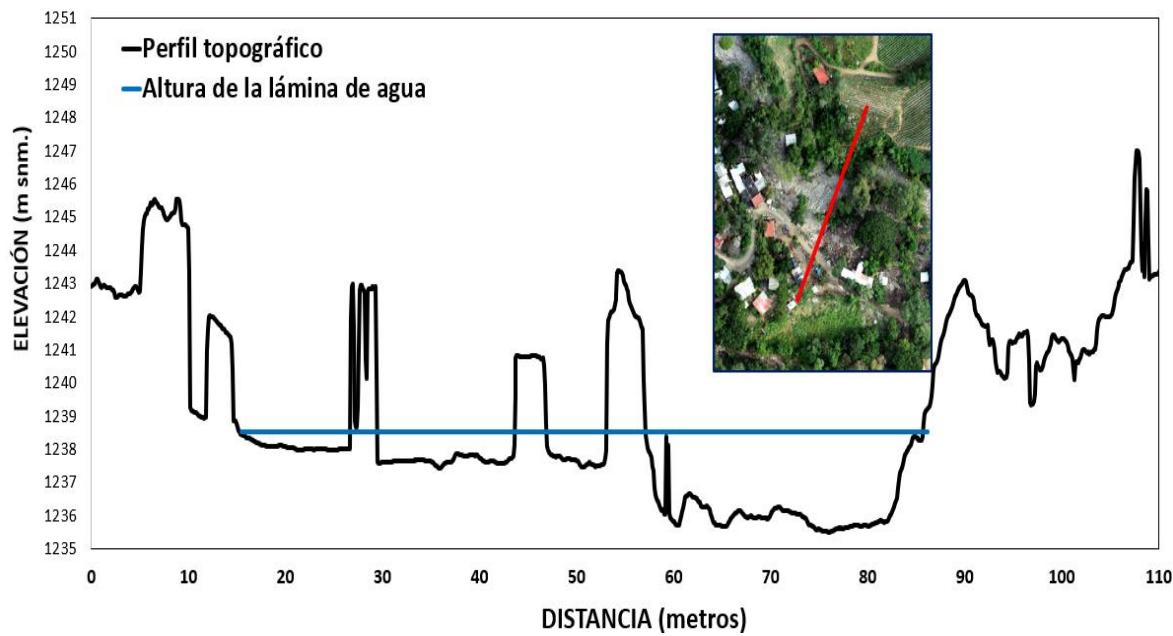


Figura 19. Perfil hidráulico transversal de la sección El Jalocote.

La tercera sección transversal después de la localidad El Jalocote muestra una elevación de la lámina de agua con respecto al nivel del mar de 1211.6 metros, la pendiente estimada fue de 0.114 metros y un coeficiente de rugosidad adimensional de Manning de 0.065. Con estos valores se obtuvo un caudal promedio de $391.26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con una velocidad de 6.13 m s^{-1} , con un tirante medio de 3.13 metros, el perímetro mojado de la sección fue de 48.83 metros, con un área mojada de 63.87 m^2 y un radio hidráulico de 1.28 metros (Figura 20).

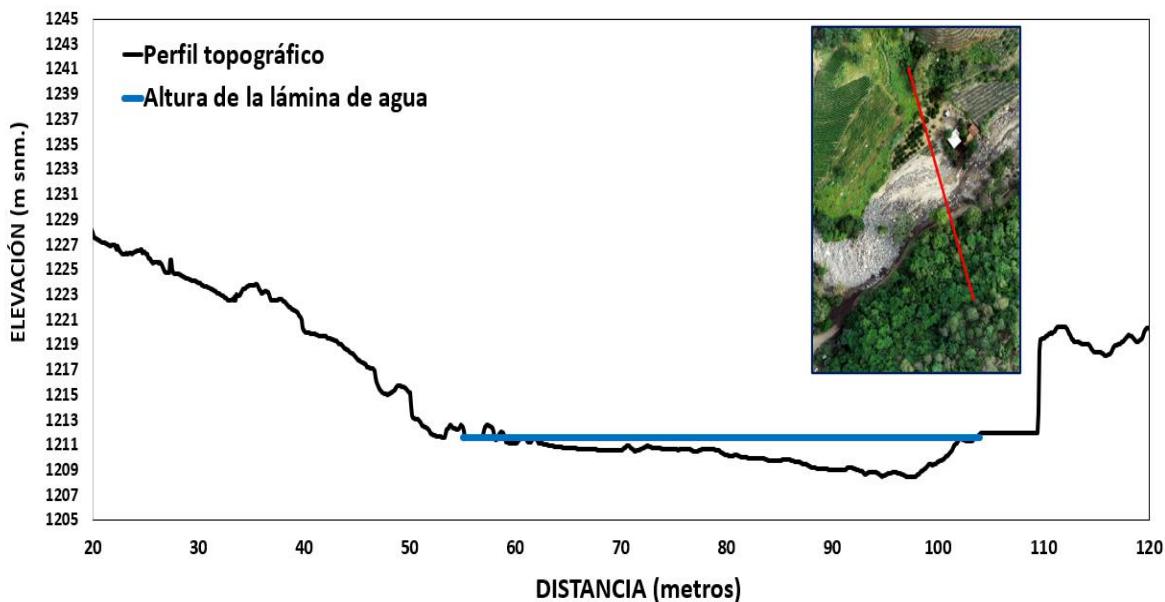


Figura 20. Perfil hidráulico transversal de la sección después El Jalocote.

IV. Análisis del probable origen del siniestro ocurrido en el Jalocote.

De acuerdo con los antecedentes revisados del incendio forestal, las características meteorológicas de los eventos de precipitación del 24-25 de septiembre, las características físicas de la subcuenca El Zapote, la geología y edafología, podemos concluir lo siguiente:

1. El incendio forestal presentado del 10 al 13 de junio causó de la quema de la materia orgánica superficial y de la defoliación de gran parte del estrato arbóreo de la zona quemada de 663.5 ha. Aún cuando se consideró un incendio de baja intensidad en su mayor porcentaje, se puede inferir que hubo comportamiento intenso en algunas zonas dentro del polígono, sobre todo aquellas que corresponden a las partes altas de los parteaguas de la cuenca. Sin embargo, SEMADET (Figura 21) en análisis cartográfico, considera diferentes niveles de severidad del incendio, dominado por baja a moderada severidad, pero también considera áreas de moderada a alta severidad, principalmente en la zona del Cerro Las Joyas, que es parte de la subcuenca Los Zapotes. Además, indica dos localidades como amenazadas, una de ellas es la comunidad de El Jalocote que se sitúa inmediatamente debajo del área quemada y ubicado en la descarga de la red hidrológica de la subcuenca Los Zapotes. El incendio cubrió 73% de la superficie de la subcuenca Los Zapotes, lo que corresponde a 484 ha, razón por la cual la subcuenca Los Zapotes se considera como de alta vulnerabilidad.

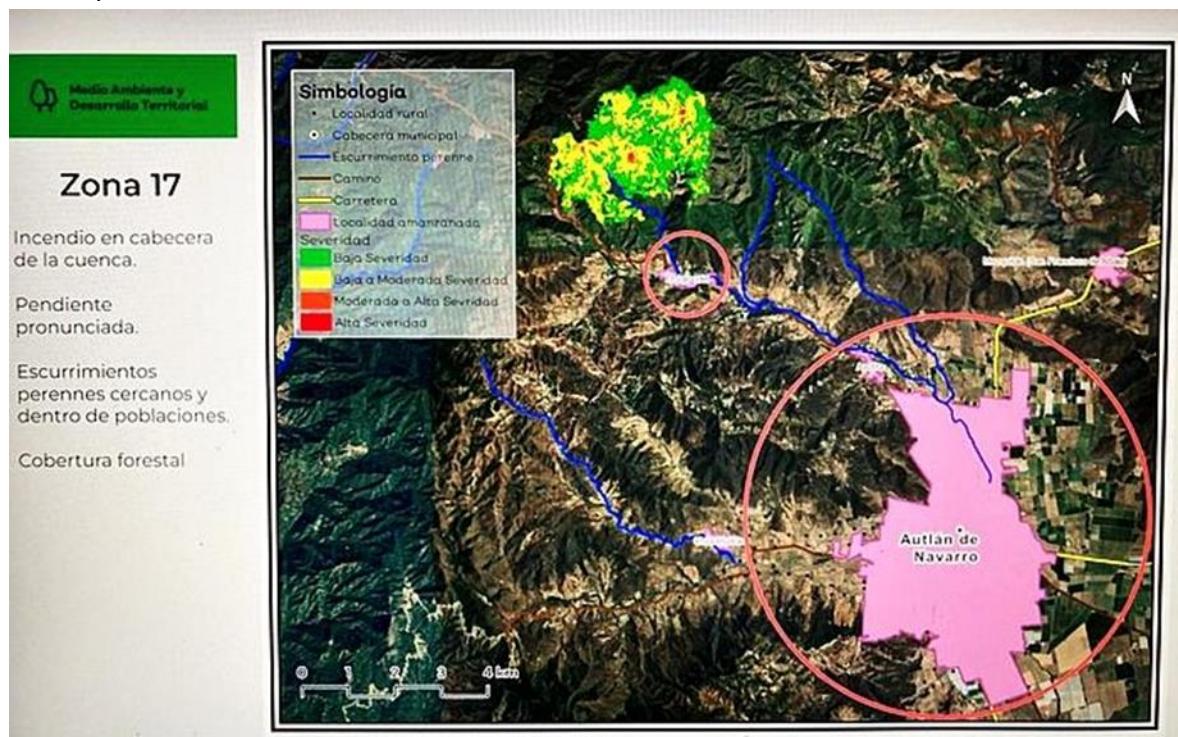


Figura 21. Delimitación y clasificación del incendio forestal y las zonas amenazadas (Fuente: SEMADET, 2023).

2. El evento de lluvia presentado el día 25 de septiembre entre las 6:30 AM y las 7:00 AM no fue un evento extraordinario ni atípico, ya que se estima una lluvia máxima de 35 mm y una intensidad aproximada de 39 mm/h, basado en los datos de estaciones climatológicas cercanas, imágenes de radar de la empresa METEOBLUE y CONAGUA como presentamos anteriormente. Sin embargo, durante el mes de septiembre se precipitaron en la zona alrededor 106 mm (Figura 6) que fueron humedeciendo y saturando los suelos someros de la parte alta.
3. El suelo desprovisto de vegetación, la lluvia acumulada y el evento de lluvia del día 25 de septiembre debilitaron la estabilidad de las laderas con alta pendiente y la fuerza de gravedad generó una avalancha de rocas y lodo que se desprendió de la parte alta de la cuenca y fue descargada en la salida de la subcuenca Los Zapotes (donde se ubica el poblado de El Jalocote), ya que ahí precisamente el arroyo cambia de pendiente y depositó el material que arrastró a altas velocidades. El material arrastrado estaba dominado por material anguloso (no redondeado que normalmente predomina en el arroyo) por lo que es material de reciente arrastre. De acuerdo con un modelo hidráulico (Figuras 18, 19 y 20), se realizaron las siguientes estimaciones:

Cuadro 5. Estimación de la creciente por el método de huella máxima.

Tirante (m)	Velocidad del caudal (m/s)	Caudal Estimado de la creciente (m ³ /s)
2.76	6.2	387.88
3.02	4.43	390.48
3.13	6.13	391.26
Media	2.97 m	5.58 m/s
		391 m³/s

4. Consideramos que los troncos y ramas que arrastró la corriente aguas abajo del arroyo El Cangrejo no provienen de la zona del incendio, ya que no se encontró evidencia de troncos quemados abajo, sino que la vegetación proveniente de las riberas fue destruyendo a su paso la avalancha de rocas de la parte alta hasta su descarga (Figura 22). De manera general, los mayores impactos del desbordamiento del arroyo El Cangrejo sobre las riberas y la vegetación ribereña se presentan en la zona rural (porción media-alta de la cuenca), entre los poblados de El Jalocote- La Lima y Ayutita, donde se puede observar una severa disminución de la cobertura de la franja de vegetación ribereña, reduciéndolo a pequeños parches de árboles maduros, y en algunos tramos se observan árboles aislados. La corriente generó una remoción intensa del sotobosque (arbustos y hierbas).

La condición de las orillas y sección transversal del cauce ha sido fuertemente modificada con respecto a su condición anterior al desbordamiento (Figura 22). En principio, debido al arrastre de árboles de las riberas durante la inundación, la erosión de las orillas del cauce y procesos de transporte y acumulación de grandes rocas (además de sedimentos de distintas granulometrías guijarros, gravas, arenas, limos) en diversas secciones del arroyo, generando la ampliación del tamaño del cauce y desviación del cauce principal.

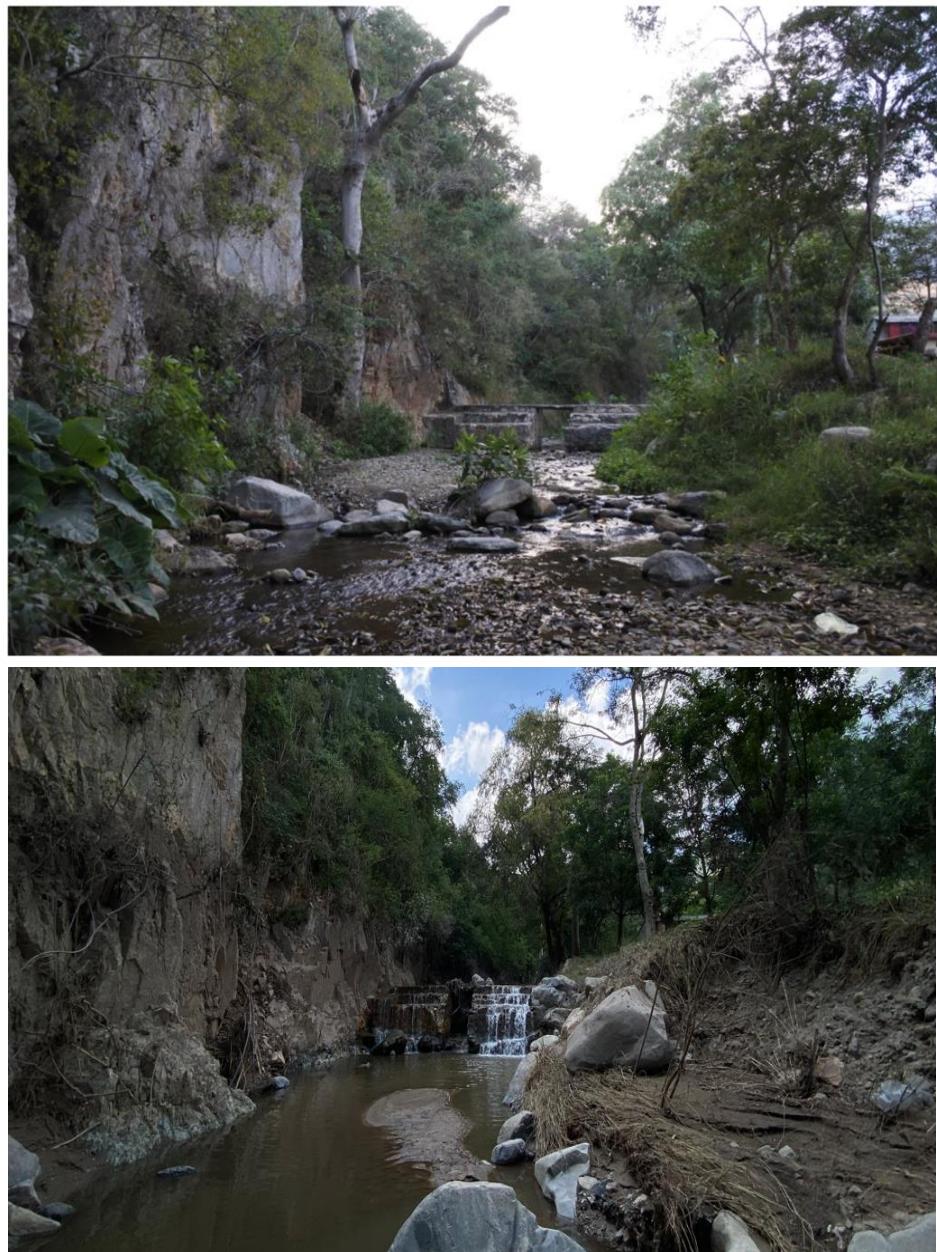


Figura 22. Sitio El Primer Paso, arroyo El Jalocote; 2020 (arriba) y 2023 (abajo, después del desbordamiento).

5. Las viviendas afectadas en el poblado El Jalocote no se encontraban en el cauce del arroyo Los Zapotes, pero si en la llanura de inundación de ese arroyo, en el área de descarga hacia el arroyo El Cangrejo, una zona considerada como de alto riesgo y donde prácticamente hizo el depósito de todas las rocas que arrastró debido al cambio de pendiente (Figura 23).



Figura 23. Arrastre y destrucción en el poblado El Jalocote. La imagen superior se obtuvo de Google Earth y la imagen de abajo fue generada utilizando un dron topográfico unos días después del evento.

V. Conclusiones

Si bien no se puede predecir cuándo sucederán eventos naturales como un terremoto o una avalancha, ni la magnitud con que se presentarán, si es factible poder tomar las medidas preventivas para proteger a la población del riesgo potencial ante cualquier eventualidad de este tipo.

La avalancha de piedra, lodo y troncos que se presentó en San Gabriel, Jalisco, el 2 junio de 2019 causado por el cambio de uso del suelo y los incendios forestales de la zona, debería haber sido un parteaguas para cambiar la forma como prevenimos a la ciudadanía ante estos desastres. Después de esta catástrofe en San Gabriel, el reportero Serrano Jauregui (2019) en la Gaceta de la Universidad de Guadalajara escribió un reportaje sobre este evento que denominó “Una tragedia que se puede repetir” y se pensó que el hecho de que cinco personas murieron y hubo cerca de 3,000 damnificados habría de generar un cambio en las políticas públicas municipales y estatales a través de las Unidades de Protección Civil y Bomberos y mejorar los sistemas de prevención. Sin embargo, apenas unos días después, el 26 y 27 de junio de ese mismo año se presentaron dos severas inundaciones en el Arroyo Seco, producto del escurrimiento de agua del Bosque La Primavera, que se había quemado en esa zona en el mes de abril de ese año (Tlajomulco, 2019).

En el caso del Jalocote, se minimizó la situación al señalarse que el incendio fue de baja intensidad en su mayor superficie, sin considerar la presencia del poblado en la parte baja y a una distancia relativamente corta del área afectada por el incendio, con una pendiente sumamente alta de las laderas adyacentes, suelos someros y un evento de lluvia que no fue atípico, sino que cayó sobre un suelo saturado que debilitó la fuerza de retención y la fuerza de gravedad provocó la avalancha. Además, considerando que la SEMADET elaboró un mapa de la severidad del incendio y en donde indicaba las poblaciones que estaban amenazadas por el incendio en donde incluyó al poblado de El Jalocote y a la misma cabecera municipal (Figura 21), hay que añadirle que a lo largo de los últimos años el crecimiento urbano en la cuenca del arroyo El Cangrejo ha estado vinculado a los arroyos y zonas de inundación, invadiendo la zona federal sin ninguna regulación y control por parte del municipio de Autlán de Navarro.

Esperamos que este informe ayude a generar conciencia en como manejamos nuestros recursos naturales y como estamos incrementando el riesgo en nuestras vidas y propiedades. Debe prevalecer el principio precautorio para la prevención y control de los efectos nocivos de los factores ambientales en la salud humana establecido en la Carta Mundial de la Naturaleza y adoptada por las Naciones Unidas en 1982; jurisprudencia vinculante para el estado mexicano y establecido en el artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos como el derecho humano a vivir en un medio ambiente sano (Anglés, 2018).

VI. Recomendaciones.

1) Monitoreo y Alerta Temprana

- Establecer un sistema de monitoreo continuo del clima y las condiciones del suelo para detectar patrones climáticos que puedan desencadenar avalanchas de piedras y lodo.
- Implementar un sistema de alerta temprana que permita a los residentes recibir notificaciones rápidas y precisas en caso de un aumento repentino del riesgo, permitiéndoles tomar medidas preventivas.
- Actualizar los mapas de riesgo para el municipio, definiéndolos en base a su nivel de riesgo y con zonas debidamente definidas.
- Identificar las zonas de invasión de la zona federal y zonas de alto riesgo y tomar las medidas legales para su corrección.

2) Estrategia de comunicación y educación ambiental a la sociedad

- Llevar a cabo campañas educativas para informar a los residentes locales sobre los riesgos asociados con las avalanchas de piedras y lodo y proporcionar orientación sobre las medidas de seguridad y evacuación.
- Colaborar con las comunidades locales para fomentar prácticas de uso del suelo sostenibles y promover la participación ciudadana en la prevención y mitigación de desastres naturales.

3) Infraestructura de Protección

- Construir estructuras de protección, como muros de contención y diques, en áreas estratégicas para desviar el flujo de las avalanchas lejos de zonas habitadas y vías de comunicación.
- Realizar inspecciones regulares y mantenimiento de estas estructuras para asegurar su efectividad a largo plazo.
- Realizar la limpieza o desazolve de los cauces basado en estudios hidrológicos de los cauces, tal como lo marca la ley, que permita definir el ancho y profundidad más adecuado a todo lo largo del arroyo o río, es decir con una visión integral de la cuenca y técnicamente adecuado y no solo basado en la experiencia del maquinista o el responsable de la maquinaria.

4) Conservación de ecosistemas y restauración ecológica.

- Diseñar acciones de conservación de los ecosistemas y biodiversidad, restauración ecológica en sitios degradados de cabeceras de cuenca, riberas y cauces, así como la rehabilitación y mejoramiento de sistemas productivos y agropecuarios y forestales y la mitigación del impacto ambiental de estas actividades productivas y del desarrollo de infraestructura.
- Permitir la auto-rehabilitación geomorfológica, trabajada por los caudales naturales del arroyo que revitalizarán la dinámica y movilizarán los sedimentos, renovando así los hábitats y favoreciendo con ello el desarrollo natural del ecosistema del arroyo y sus riberas.
- Priorizar las opciones de manejo de las zonas de ribera: *1o. Conservación* de aquellas zonas que mantienen buen estado ecológico (componentes, estructura y funcionamiento), para mantener su estado actual y prevenir alteraciones futuras en el sistema ribereño (zonas de cabecera de la cuenca); *2o. Protección* de aquellas zonas de ribera donde con acciones efectivas como el diseño de medidas de compensación sería posible eliminar o reducir las presiones e impactos y mejorar las condiciones ambientales (zona media de la cuenca); *3o. Restauración /Rehabilitación* en zonas ribereñas de mayor degradación, reduciendo las presiones e impactos, de tal manera que se pueda ir reintroduciendo o mejorando gradualmente las funciones hidrológicas y ecológicas, y mejorar la percepción social acerca del estado de salud del arroyo (zona baja: urbana y agrícola de la cuenca).
- Utilizar especies nativas realizando su plantación acorde a las característica del tramo del arroyo son: *Salix humboldtiana* (sauce), *Guazuma ulmifolia* (guácima), *Enterolobium cyclocarpum* (parota), *Fraxinus uhdei* (fresno), *Juniperus flaccida* (jalocote), *Tabebuia rosea* (rosamorada), *Prosopis laevigata* (mezquite), *Pithecellobium dulce* (guamúchil), entre otros (Ortiz, 2015).

5) Planificación y regulación del Uso del Suelo

- Implementar políticas de planificación del uso del suelo que restrinjan la construcción en áreas propensas a avalanchas y deslizamientos.
- Realizar evaluaciones de riesgos antes de aprobar nuevos desarrollos y construcciones en las cercanías del arroyo El Cangrejo, y establecer zonas de exclusión en áreas de alto riesgo.

6) Control de Erosión

- Implementar técnicas de control de erosión, como terrazas, barreras de trincheras y geotextiles, en las zonas de alto riesgo para reducir la erosión del suelo y prevenir deslizamientos de tierra.
- Aplicar técnicas de revegetación en las áreas más expuestas para mejorar la estabilidad del suelo y evitar la pérdida de tierra durante las lluvias intensas.

7) Coordinación Interinstitucional

- Fomentar la colaboración entre entidades gubernamentales, la Universidad de Guadalajara, organizaciones ambientalistas y comunidades locales para desarrollar estrategias integrales y coordinadas de reducción de riesgos.
- Establecer comités de gestión de desastres locales que incluyan representantes de todas las partes interesadas para garantizar una respuesta rápida y efectiva en caso de emergencia.

Finalmente, implementar estas recomendaciones de manera integral y sostenible requerirá la colaboración activa y continua entre las autoridades locales, los expertos en gestión del riesgo, las comunidades afectadas y las organizaciones académicas y ciudadanas, dedicadas a la conservación del medio ambiente. Al seguir estas pautas, se puede reducir significativamente el riesgo por avalancha de piedras y lodo en el arroyo El Cangrejo, proporcionando así una mayor seguridad a los residentes y preservando la integridad del entorno natural.

VII. Bibliografía

- Anderson, H.E. (1982) Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior (Gen. Tech. Rep. No. INT-122). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station., Ogden, Utah, U.S.
- Andrews, P. L., Bevins, C. D., & Seli, R. C. (2005). BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's Guide. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106 Revised. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 132p., 106.
- Anglés H., Marisol. El principio precautorio en México: Plaguicidas, Medio Ambiente y Salud. En: Chan S., F.A. Ibarra P y Medina Arellano, M. (coordinadores). Bioética y Derecho. Reflexiones clásicas y nuevos desafíos. Instituto de Investigaciones Jurídicas. UNAM. 454 p.
- Arcement, G.J. y V. R. Schneider. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains del U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339. US Geological Services. 38 p. <https://doi.org/10.3133/wsp2339>
- Carrillo A., Z.G. (2020). Análisis de las condiciones socioambientales de la microcuenca del arroyo El Cangrejo, región costa sur de Jalisco: elementos para su manejo. Tesis de Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.
- WWF (2020). Informe Planeta Vivo 2022. Hacia una sociedad con la naturaleza en positivo. Almond, R.E.A.; Grooten M.; Juffe Bignoli, D. y Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Suiza.
- CETENAL. 1996. Carta Edafológica E13B12. Escala 1:50,000.
- Comisión Estatal del Agua Jalisco (CEA Jalisco) (2015). Ficha técnica hidrológica municipal Autlán de Navarro. Guadalajara, México: Gobierno del Estado de Jalisco.
- CONAFOR. 2023a. Concentrado Nacional de Incendios Forestales. Comisión Nacional Forestal. https://monitor_incendios.cnf.gob.mx/incendios_tarjeta_semanal
- CONAFOR. 2023b. Reporte Nacional Semanal de Incendios Forestales. Información preliminar del 1 de enero al 5 de octubre de 2023. Coordinación General de Conservación y Restauración. 21 pag. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/reporte-semanal-de-incendios>
- CONAFOR. 2023c. Sistema de predicción de peligro de incendios forestales – SPPIF de México. CONAFOR-CONACYT 2014-2-252620. Recurso en línea: <http://forestales.ujed.mx/incendios2/> Acceso: octubre de 2023.
- CNN Español. 25 de septiembre de 2023. Desbordamiento de un arroyo deja siete muertos en Jalisco, México
<https://cnnespanol.cnn.com/2023/09/25/desbordamiento-jalisco-muertos-mexico-orix/>
- Contreras-Martínez, S. 2017. Listado preliminar de aves de la Sierra de Cacoma. Base de datos 2000-2017. Laboratorio de Zoología, Departamento de Ecología y Recursos Naturales. Universidad de Guadalajara-CUCSUR.

Guerrero, A., P.R.W. Gerritsen, L.M. Martínez R., S. Salcido, D. Meza, y H. Bustos. 2010. Gobernanza y participación social en la gestión del agua en la microcuenca El Cangrejo en el municipio de Aulán de Navarro, Jalisco, México. *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. X, núm. 33, 2010: 541-567.

González del Tánago, M. y D. García de Jalón (2007). Restauración de ríos y riberas. Guía metodológica para la elaboración de proyectos.

González del Tánago, M., D. García de Jalón (2011). Riparian Quality Index (RQI): A methodology for characterising and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnetica* 30 (2): 235-254.

Heinsch, F. A., & Andrews, P. (2010). Fire characteristics charts for fire behavior and US fire danger rating. In Proceedings of the 3rd Fire Behavior and Fuels Conference (pp. 25-29).

Instituto de Información Estadística y Geográfica (IIEG) (2010). Datos socioeconómicos. Unidad de Estadística Sociodemográfica.

INEGI. 2023. Información geoespacial de suelos, escala 1:50 000. Clasificación mundial de suelos de la FAO. Recurso en línea: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#mapas> Acceso: octubre de 2023.

Junta Intermunicipal de Medio Ambiente para la Gestión Integral de la Cuenca Baja del Río Ayuquila (JIRA). 2017. Informe anual. <https://www.jira.org.mx/imagenes/informes/INFORME%20ANUAL%20POA%202017.pdf>

Junta Intermunicipal de Medio Ambiente de la Costa Sur (JICOSUR). 2017. Estudio técnico justificativo para la declaratoria del área estatal de protección hidrológica Sierra de Cacoma.

Knighton, David (1998). Fluvial forms and processes: a new perspective (2nd edición). Routledge. ISBN 978-0340663134. 400 p.

La Jornada. 26 de septiembre de 2023. Buscan a dos desaparecidos en Jalisco por desborde de río Jalocote.

<https://www.jornada.com.mx/noticia/2023/09/26/estados/buscan-a-dos-desaparecidos-en-jalisco-por-desborde-de-rio-jalocote-5578>

López-Aguilar M., S. Contreras-Martínez, O. Cárdenas-Hernández y C. Ortíz Arrona. 2023 (proceso). Diversidad de aves en la microcuenca El Cangrejo, occidente de México. Universidad de Guadalajara.

Martínez G., A.F. (2020). Impacto de la urbanización sobre el manejo de los recursos hídricos en la cuenca El Cangrejo, Aulán, Jalisco. Tesis de Licenciatura Ingeniero en Recursos Naturales y Agropecuarios, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.

METEORED (28 de septiembre de 2023) Se repite la tragedia en Jalisco; se desborda río en Aulán y deja a su paso destrucción y muerte.

<https://www.meteored.mx/noticias/actualidad/se-repite-la-tragedia-en-jalisco-se-desborda-rio-en-autlan-y-deja-a-su-paso-destruccion-y-muerte-accidentes-deslizamiento.html>

Meza, R.D. (2006). Caracterización hidrográfica de la cuenca Ayuquila-Armería mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfica. Tesis de Licenciatura Ingeniero en Recursos Naturales y Agropecuarios, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.

Milenio. 25 de septiembre de 2023. Mueren ocho al desbordarse arroyo El Jalocote en Autlán de Navarro, Jalisco. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/autlan-navarro-8-muertos-desbordamiento-arroyo>

Morales-Arias JG, Cuevas-Guzmán R, Rodríguez-Hernández JL, Guzmán-Hernández L, Núñez-López NM, Sánchez-Rodríguez E V., Solís-Magallanes A, Santana-Michel FJ. 2016. Flora vascular de Villas de Cacoma, sierra de Cacoma, Jalisco, México. Bot Sci. 94(2):393–418. doi:<https://doi.org/10.17129/botsci.447>.

Ortiz A., C.I. (2019). Los corredores ribereños en la cuenca del río Ayuquila-Armería en México. Vegetación ribereña y calidad de las riberas. Universidad de Guadalajara.

Ortiz-Arrona, C.I., P. Gerritsen, L.M. Martínez R., O. Cárdenas H., S. Contreras M. (2022). Conservación y manejo de los recursos naturales de la cuenca del arroyo El Cangrejo, municipio de Autlán, Jalisco. Informe Técnico. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.

Rzedowski, J. (ed.). 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. Mexico, DF.

Rojas L., J. (En proceso). Plan de restauración ecológica de la vegetación ribereña de la cuenca del arroyo El Cangrejo, Autlán de Navarro, Jalisco, México. Tesis de Maestría.

Serrano Jauregi, Iván. 2019. Una tragedia que se puede repetir. Gaceta. Universidad de Guadalajara. <http://www.gaceta.udg.mx/una-tragedia-que-se-puede-repetir/>

SMG. 2007. Carta Geológica Minera. Autlán de Navarro, Jal. E13-B12. Escala 1:50,000. Servicio Geológico Mexicano.

Solís M., A. 2019. Colecta botánica de la vegetación en el Arroyo El Cangrejo. Proyecto “Conservación y manejo de los recursos naturales de la cuenca del arroyo El Cangrejo, municipio de Autlán, Jalisco” (Responsable Claudia Irene Ortiz Arrona). Herbario ZEA, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.

Tlajomulco. 2019. Declaran emergencia en Tlajomulco por inundaciones y deslave de lodo. Boletín Informativo. Julio 1 de 2019. <https://tlajomulco.gob.mx/comunicacion-institucional/declaran-emergencia-en-tlajomulco-por-inundaciones-y-deslave-de-lodo>

UDG TV. (2 de octubre de 2023) Tragedia en El Jalocote pone en evidencia errores de planificación territorial y gestión de riesgos

<https://udgtv.com/noticias/tragedia-en-el-jalocote-pone-en-evidencia-errores/198708>

Ven Te Chow. (1982). Hidráulica de los canales abiertos. ISBN 968-13-1327-5. Editorial LIMUSA. México. 667 p.

Anexo 1. Reportajes de la prensa sobre la avalancha de piedra y lodo en el Jalocote

Los medios reportaron los siguiente:

Milenio. 25 de septiembre de 2023. Mueren ocho al desbordarse arroyo El Jalocote en Aulán de Navarro, Jalisco

<https://www.milenio.com/politica/comunidad/autlan-navarro-8-muertos-desbordamiento-arroyo>

“El alcalde refirió que debido a la lluvia atípica registrada la madrugada de este lunes en el municipio, la creciente originó que se desbordaran una gran cantidad de rocas que al final de cuentas generaron esa situación que tomó por sorpresa a los pobladores quienes no tuvieron tiempo para evacuar la zona. Añadió que el cauce del agua afectó alrededor de cinco viviendas que quedaron completamente destruidas y diez casas más tuvieron afectaciones por la filtración del agua en sus fincas, por lo que habilitaron un albergue temporal en la escuela primaria de Jalocote, el cual, cuenta con los insumos suficientes para que sea más llevadera la situación estos días. “

CNN Español. 25 de septiembre de 2023. Desbordamiento de un arroyo deja siete muertos en Jalisco, México

<https://cnnespanol.cnn.com/2023/09/25/desbordamiento-jalisco-muertos-mexico-orix/>

“Al menos siete personas murieron y otras nueve permanecen desaparecidas tras el desbordamiento del arroyo El Jalocote, ubicado en el municipio de Aulán de Navarro, Jalisco, según informó Enrique Alfaro, gobernador del estado.”

La Jornada. 26 de septiembre de 2023. Buscan a dos desaparecidos en Jalisco por desborde de río Jalocote.

<https://www.jornada.com.mx/noticia/2023/09/26/estados/buscan-a-dos-desaparecidos-en-jalisco-por-desborde-de-rio-jalocote-5578>

“*Puerto Vallarta, Jal.* Decenas de elementos del Ejército Mexicano, Guardia Nacional, Cruz Roja, así como Protección Civil estatal y municipal del estado, realizan la búsqueda de al menos dos personas desaparecidas derivado de la crecida y desbordamiento del arroyo Jalocote, en Aulán de Navarro, Jalisco, reportaron autoridades.”

“La dependencia confirmó la muerte de ocho personas, entre ellas se encuentra el agente municipal de Jalocote, Pedro Arias, dos personas desaparecidas, tres personas lesionadas, más de 50 viviendas afectadas, cinco fincas desaparecidas, así como dos puentes y un vado.”

METEORED (28 de septiembre de 2023) Se repite la tragedia en Jalisco; se desborda río en Aulán y deja a su paso destrucción y muerte.

<https://www.meteored.mx/noticias/actualidad/se-repite-la-tragedia-en-jalisco-se-desborda-rio-en-autlan-y-deja-a-su-paso-destruccion-y-muerte-accidentes-deslizamianeto.html>

“Los hechos ocurrieron el lunes 25 de septiembre, según los primeros reportes de los cuerpos de emergencia detallaron que la creciente del río arrastró con todo, lo que sorprendió a los pobladores.”

“Fue una tragedia parecida a lo ocurrido el 18 de septiembre del 2020, en otro municipio de Jalisco llamado San Gabriel, donde una avalancha de piedras, palos y lodo afectó a la cabecera municipal dejando un saldo de 5 personas muertas y una desaparecida.”

“El alcalde del municipio Gustavo Salvador Robles Martínez, explicó que el desbordamiento del río se debió a **un incendio forestal en la Sierra de Cacoma en junio, en la parte alta de Autlán de Navarro que arrasó con mil hectáreas de bosque**, lo que generó miles de troncos que fueron arrastrados con la tormenta de la madrugada del lunes y que saturaron el río, provocando el arrastre de la materia orgánica que originó el desastre. De acuerdo con el gobierno de Autlán, se registraron alrededor de **200 milímetros de lluvia por cada metro cuadrado**, lo que generó que la corriente creciera y el agua arrastrara lo que encontró a su paso.”

UDG TV. (2 de octubre de 2023) Tragedia en El Jalocote pone en evidencia errores de planificación territorial y gestión de riesgos

<https://udgtv.com/noticias/tragedia-en-el-jalocote-pone-en-evidencia-errores/198708>

“Hace una semana, una tormenta desencadenó una serie de sucesos catastróficos, dejando un saldo de 9 personas fallecidas y una más desaparecida en la localidad de El Jalocote, municipio de Autlán de Navarro, Jalisco. Lo que comenzó como una lluvia calificada de "atípica" llevó a un evento sin precedentes: el desbordamiento del arroyo que serpentea desde la comunidad de El Jalocote hasta la cabecera municipal de Autlán. A raíz de este desastre, surgen preguntas sobre las causas, la gestión territorial y las consecuencias para las comunidades afectadas. Para las autoridades municipales, el evento se agravó debido a los efectos del incendio forestal que arrasó aproximadamente 1000 hectáreas de bosque en la zona alta de la sierra de San Juan Carcoma durante el mes de junio.”

“Según el gobernador del estado de Jalisco, Enrique Alfaro Ramírez, las viviendas arrasadas son responsables debido a su ubicación cercana al cauce. También es cierto que tras el incendio de junio las autoridades de protección civil anticiparon este escenario, pero las medidas tomadas por los tres niveles de gobierno resultaron insuficientes al clasificar la zona como de baja incidencia de riesgo.”

“Tras décadas de habitar el cauce de un arroyo seco, los habitantes de La Lima y Jalocote **no previeron la situación** que los tomó por sorpresa, y tampoco recibieron ninguna alerta por parte de las autoridades.”