

Exposición y vulnerabilidad de infraestructura de tipo residencial expuesta a inundabilidad

Estudio de caso: Cuenca del río Grande de San Miguel

López, L. ORCID: 0009-0008-6049-2453; Chávez, T. ORCID: 0000-0003-4525-5894.

Gerencia de Investigación, Desarrollo e Innovación. Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.

lisandrolopez@ambiente.gob.sv, tchavez@ambiente.gob.sv

Resumen – El río Grande de San Miguel es un sistema fluvial con una recurrencia alta de inundaciones en infraestructura y anegamientos de terreno (Kattan et. al. 2017, Villalobos, 2020), dando lugar a pérdidas económicas, pérdidas de vidas humanas y desplazados en la cuenca. Considerando lo anterior, se realizó un estudio para evaluar la exposición actual por inundabilidad en las zonas aledañas al cauce del río. Se presentan los resultados obtenidos de: (i) la modelación hidrológico-hidráulica considerando como precipitación de modelación, la registrada en el evento Julia de octubre del 2022, (ii) el modelo de exposición y (iii) de la caracterización de la vulnerabilidad física de la infraestructura tipo residencial con tipologías estructurales de adobe y mampostería confinada. Luego de realizar el modelo hidrológico e hidráulico se estimó que, de ocurrir un evento similar a Julia del año 2022, el cual posee un periodo de retorno de 100 años, se tienen más de mil construcciones expuestas a procesos de inundabilidad. De las cuales el 91 por ciento corresponden a viviendas construidas de mampostería reforzada RM2L y el 9 por ciento corresponden a viviendas de adobe. Ante procesos de inundabilidad, se evidencia que las viviendas de adobe están más propensas a sufrir colapso si se presentan calados cercanos a 3 metros o velocidades de flujo mayores a 1.5 m/s.

Palabras clave: Exposición física, vulnerabilidad, inundabilidad, modelación hidrológica, modelación hidráulica.

Abstract – Río Grande de San Miguel is a river system with a high recurrence flooding of infrastructure and flooding of land (Kattan et. al. 2017, Villalobos, 2020), which leads to economic losses, loss of human life and displaced people in the middle and lower basin of the river. Considering the above, a study to evaluate the current exposure due to flooding in the areas surrounding the river was carried out. This article presents the results of: (i) the hydrological-hydraulic modeling considering the Tropical Storm Julia of October 2022 as the modeling precipitation; (ii) also the exposure model and; (iii) the characterization of the physical vulnerability of adobe and confined masonry residential infrastructure. It was concluded that if an event similar to Julia, with an estimated return period of 100 years, occurs, there will be more than 1000 households exposed to flooding, 91 percent of which correspond to homes that have mostly been built with a RM2L reinforced masonry structural system and the rest to adobe homes. Has been identify that adobe homes are more prone to collapse if there are flood depths close to 3 meters or flow speeds greater than 1.5 m/s.

Keywords: exposure, vulnerability, floods, hydrological modeling, hydraulic modeling.

I. INTRODUCCIÓN

Según Gallegos (2022), en la actualidad se ha observado un aumento en la ocurrencia de amenazas naturales, y en climas cálidos, el incremento en la ocurrencia de inundaciones ha sido más evidente. Se ha destacado que en la medida en que aumente la extensión de un área urbanizada, se van generando las condiciones para que una progresiva e imparable impermeabilización, ocasionando numerosos problemas medioambientales, especialmente vinculados a la

gestión del agua e incremento de los riesgos debido a inundaciones (Gonzalez, 2019).

La ciudad de San Miguel, como otras en El Salvador, ha experimentado un crecimiento en las últimas décadas. A partir del procesamiento y análisis de imágenes satelitales, se ha estimado que desde el año 1980 al 2024, la ciudad casi ha duplicado su extensión, siendo los periodos de 1980- 1990 y 2000-2024, aquellos en los que el suelo urbano se ha expandido a mayor velocidad (fig. 1). Dicho crecimiento ha implicado un aumento de exposición física en un área que representa menos del 2 por ciento del distrito de San Miguel, un cambio en el

medio ambiente y con ello, una reducción en la capacidad de infiltración del suelo. Además, Se observa que dentro de la cuenca se ubican asentamientos humanos en zonas con moderada o alta recurrencia a inundaciones, producto de las deficiencias en el planeamiento urbano y de asentamientos. (Kattan et al., 2017, p.73).

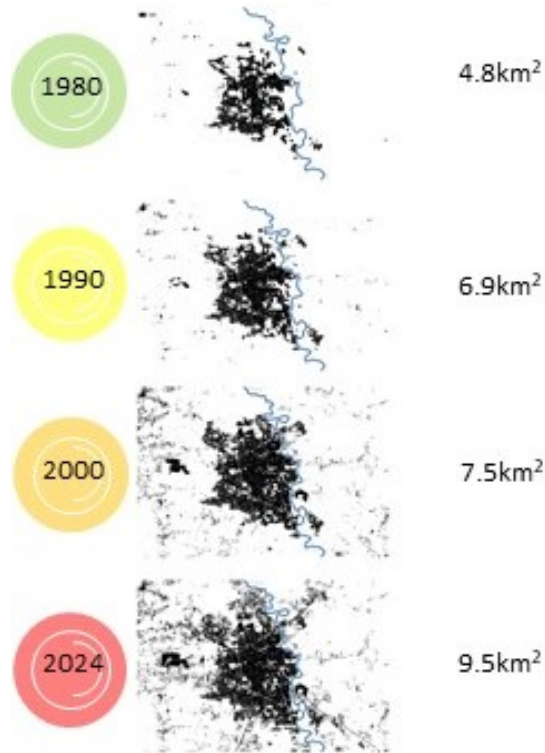


Fig. 1. Evolución de la mancha urbana en San Miguel. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Debido a lo anterior, en años recientes, los daños y pérdidas vinculadas a la ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Grande de San Miguel se han incrementado. En el área de estudio, las inundaciones se han registrado a una tasa de al menos una por año. Para los eventos hidrometeorológicos extremos que han afectado a El Salvador en el periodo de 2015 a 2022, los eventos que han generado mayores impactos han sido, Michael y Vicente en el 2018, VP 91 E y 92E en mayo del 2019, Cristóbal en el 2020 y Julia 2022.

El crecimiento de la ciudad implica un crecimiento en la exposición, por lo que con el aumento de la peligrosidad se requiere que se realicen estudios para caracterizar el riesgo en dicha área. Ya que se los estudios de inundabilidad apoyan la planificación y diseño de obras de protección contra inundaciones (Materón et. al, 2007), y constituyen una herramienta para la predicción de áreas inundables, proporcionando soporte científico a las actualizaciones normativas de la gestión integral de riesgos (Gallegos, 2022).

II. MARCO TEÓRICO

A. Evaluación del riesgo

El riesgo va asociado a una probabilidad de que ocurran consecuencias perjudiciales, como daños a la propiedad o pérdidas de vidas humanas, resultado de la interacción entre amenazas naturales y los elementos expuestos que responden a partir de las condiciones de vulnerabilidad en las que se encuentren. Una evaluación del riesgo de desastre por inundación requiere del cálculo de la probabilidad de daños y pérdidas futuras asociadas con la ocurrencia de una inundación (Naváez, Lavell y Pérez, 2009, p. 9). Una evaluación completa de los riesgos no solo evalúa la magnitud y la probabilidad de pérdidas potenciales, sino que también explica las causas y el impacto de estas (PNUD, 2010. Según el PNUD (2010), la evaluación del riesgo consta de siete pasos que van desde la comprensión de la situación actual hasta la formulación de estrategias y planes de acción. En este estudio las actividades se centrarán en:

1. Comprensión de la situación actual de las necesidades y carencias para evaluar de manera sistemática los estudios de evaluación de riesgo, datos e información disponible.
2. Evaluar amenazas, identificar la naturaleza, localización, intensidad y probabilidad de ocurrencia en el área de interés.
3. Evaluación de la exposición, para determinar la población y los bienes se encuentran en situación de riesgo y delinear las zonas propensas a desastres.
4. Análisis de la vulnerabilidad para determinar la capacidad de los elementos que están en riesgo para soportar escenarios de amenaza.
5. Análisis de impactos y pérdidas.

B. Inundabilidad

Los estudios de inundabilidad son herramientas útiles en la planificación territorial y gestión responsable de riesgos ambientales ya que, permiten evaluar si una zona puede ser afectada o no por inundaciones. Los estudios de inundabilidad más que enfocarse en la probabilidad de sufrir pérdidas y daños, evalúan el comportamiento del agua tras un incremento de caudal relacionado con eventos de precipitación de diferente recurrencia o período de retorno.

En este estudio, se entiende por inundabilidad a la delimitación de una zona de libertad fluvial donde se

alcanzan los niveles máximos para un período de retorno estadístico específico o para un escenario meteorológico particular. Se ha priorizado la evaluación de inundabilidad como amenaza, ya que se ha identificado que anualmente se reportan inundaciones en zonas recurrentes dentro de la cuenca.

La inundabilidad en este estudio utiliza el escenario creado por la tormenta Julia ocurrida en octubre del 2022 para realizar la modelación hidrológica e hidráulica.

C. Exposición física y vulnerabilidad

La exposición física en la que se enfoca este estudio, habla de la distribución espacial, el valor y tipo de vulnerabilidad de las viviendas presentes en el área de estudio donde existe amenaza por inundación y que, por lo tanto, están predispuestas a experimentar pérdidas potenciales (UNDRP 1979, Silva et al., 2017, UNISDR, 2019, p. 17, MARN, 2018, p.15). Para su estimación se crea un modelo de exposición utilizando la herramienta informática HAZUS, los datos del modelo de elevación normalizada de El Salvador 2014 junto con los datos del censo de vivienda 2007 y otras fuentes provenientes de sensores remotos u otras investigaciones. De tal manera que se obtiene un modelo que permite estimar el número de construcciones, que intersecan las zonas inundables por las amenazas (MARN, 2018, p.15).

III. ÁREA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO GRANDE DE SAN MIGUEL

A. Generalidades

La cuenca del río Grande de San Miguel, comprende gran parte de los municipios del departamento de San Miguel, entre los que se encuentran los de San Miguel, Chirilagua, Quelapa, Moncagua, Chapeltique, Lolotique, Nueva Guadalupe y Chinameca. Comprende, además, parte de los municipios de Buenaventura, Jucuapa y Nueva Granada, del departamento de Usulután, y parte del municipio de El Carmen, del departamento de La Unión. El río Grande de San Miguel, se encuentra inmerso en una cuenca con una extensión superficial de 2,446.8 km², lo que da lugar a que su cauce más largo posea una longitud de 137 km. En dicha cuenca se ubican dos cuerpos de agua del tipo lacustre, la laguna de Olomega y la laguna El Jocotal, humedales naturales de una importancia ecosistémica grande. La cuenca tiene una pendiente media de 12.5%, elevación media de 263.7 m.s.n.m. y elevación máxima de 2125.1 m.s.n.m. (MARN, 2023).

La geología consiste en tobos finas, lapiaces, brechas, vítreas y rocas ígneas intercaladas con lava basáltica y/o andesítica. Depósitos recientes tales como las planicies inundables, pantanos y terrazas cubren rocas volcánicas y se encuentran localizados a lo largo del Río Grande de San Miguel y en los alrededores de las Lagunas de Olomega y El Jocotal. (JICA, 1997)

En cuanto al uso y cobertura de suelos, el 32 por ciento de la cobertura de suelo corresponde a bosque, latifoliado principalmente, 2.8 por ciento es mangle, alrededor del 38 por ciento es pasto o áreas para cultivos de granos básicos, el 5% es café y menos del 3% corresponde a un área urbanizada (MARN, 2018)

La cuenca del río Grande de San Miguel se subdivide en:

- Cuenca alta: es la parte montañosa de la cuenca, ubicada aguas arriba de la confluencia de los ríos Guayabal y Vilerías. Presenta una alta escorrentía durante la época lluviosa y una disminución en la época seca. La cuenca tiene un drenaje dendrítico y radial en las partes altas de la cuenca, especialmente en las zonas volcánicas.
- Cuenca media: empieza donde convergen los ríos Guayabal y Villerías, y termina en El Delirio. Dentro de ella se ubica la laguna de Olomega. La escorrentía superficial presenta un comportamiento moderado, sin embargo, el área urbana está propensa a sufrir inundaciones producto del desbordamiento del río. Se destacan zonas pantanosas en el área cerca de la laguna debido a lo superficial que se encuentra en manto freático.
- Cuenca baja: empieza desde el Delirio y finaliza en la desembocadura del río. Zona con pendientes bajas y nivel freático superficial lo que contribuye a la ocurrencia de desbordamientos.

(JICA, 1997, DOA, s.f.)

El río Grande de San Miguel experimenta crecidas e inundaciones por lluvias de tipo temporal, pero también ocurren inundaciones en ríos de respuesta rápida, especialmente en las cuencas que drenan desde el complejo volcánico de San Miguel. Las inundaciones en estas cuencas son ocasionadas por precipitaciones altamente convectivas – intensas y localizadas, con una duración de tres a seis horas. (Kattan et al., 2017, p.73).

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca RGSM y abarca principalmente la ciudad de San

Miguel y zonas aledañas dentro de la cuenca media y alta del río Grande de San Miguel, entre las coordenadas $X_{\min}: 587645.5$ y $Y_{\min}: 255993.9$; $X_{\max}: 596192.5$ y $Y_{\max}: 270217.9$. El área de interés de análisis posee un área de drenaje de 1,340.14 km², hasta el punto de interés, justo en la ubicación del puente sobre el desvío del Delirio, comprendiendo así, la parte alta de la cuenca y la parte media de esta. La longitud de cauce a analizar comprende desde el Caserío La Bolsa hasta el caserío El Jute, ubicado aproximadamente a 3.25 km aguas abajo del puente Moscoso, haciendo un total de 30 kilómetros.

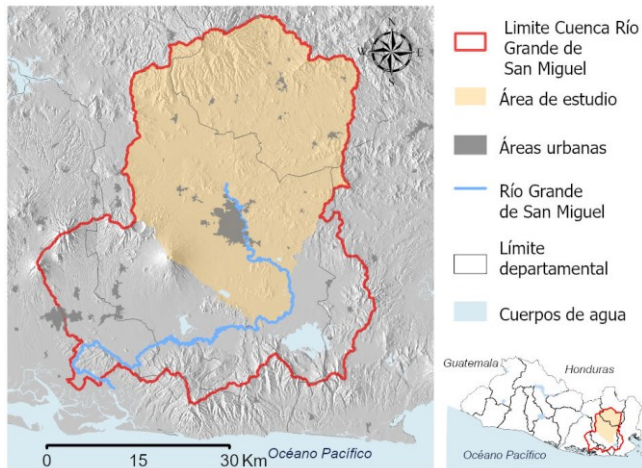


Fig. 2. Área de estudio. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

B. Eventos de inundación registrados

El río Grande de San Miguel RGSM, es un sistema fluvial con una alta recurrencia de eventos hidrometeorológicos (DOA/MARN, 2023) que dejan a su paso las consecuentes inundaciones en la llanura fluvial del río Grande con impactos negativos en los medios de vida, las viviendas e infraestructura y que quedan evidenciados en los desplazamientos humanos, pérdidas de vidas humanas, y pérdidas económicas que se observan.

En la mayoría de los casos las inundaciones se presentan debido a incrementos de los niveles y desbordamiento del Río Grande de San Miguel y en menor proporción por las lagunas Olomega, el Jocotal, Quebrada Salamar y río Las Lajas (SNET, 2005). Entre las principales inundaciones se identifican las ocurridas por desbordamiento del río Grande de San Miguel por las lluvias en 1954, por el Huracán Francelia en 1969, por el huracán Fifi en 1974, en 1998 por el huracán Mitch, en el 2005 por el huracán Stan, Agatha en 2010, DT12E en el 2011, y más recientemente por la Tormenta Tropical Julia que ocurrió en el año 2022, por mencionar algunos ejemplos. Cabe destacar que de manera general en la cuenca del RGSM se ha identificado la ocurrencia

de al menos una inundación por año en los últimos 30 años (DOA/MARN, 2023; SNET, 2005).

C. El evento hidrometeorológico: Julia octubre 2022

Los acumulados máximos del evento Julia en el año 2022 se registraron en la zona costera y cadena montañosa del norte del país, donde la estación Berlín Met registró el máximo de todo el evento, con 323.6 mm de lluvia acumulada en 72 horas. Seguido por la estación Volcán Conchagua (Conchagua, La Unión) con un máximo acumulado de 314.5 mm en el mismo periodo de tiempo. Acumulados significativos se registraron en la franja costera y cadena volcánica. Los departamentos de San Miguel, La Unión y La Libertad fueron los que reportaron mayor cantidad de afectaciones (Equipo humanitario de país, El Salvador, 2022).

Según el informe hidrológico del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales sobre "La influencia del sistema ciclónico Julia" en el 2022, para el período del 8 al 11 de octubre de 2022, las condiciones atmosféricas descritas favorecieron que ríos principales y de corto recorrido experimentaran crecidas y desbordamientos principalmente en la zona oriental y franja costera del país. Entre los desbordamientos más importantes registrados se encuentra el del río Grande de San Miguel. Además, debido a las condiciones de humedad de suelo, en esta cuenca se registraron desbordamientos del río (DOA/MARN, 2022).

Estas condiciones provocaron inundaciones en zonas urbanas, sobre la red vial. También debido a las condiciones de humedad del suelo en San Miguel se registraron anegamientos en terrenos de cultivo, potreros y viviendas.

En el catálogo de impactos hidrológicos del Centro de Pronóstico Hidrológico se reportaron inundaciones y desbordamientos, en diferentes puntos de la cuenca del río Lempa, Río Grande de San Miguel y Goascorán. Las precipitaciones registradas durante el evento Julia (07:00 a.m. del 08 de octubre a 07:00 a.m. del 11 de octubre) mantuvieron las condiciones de desbordamiento más severas hasta el día 13 de octubre.

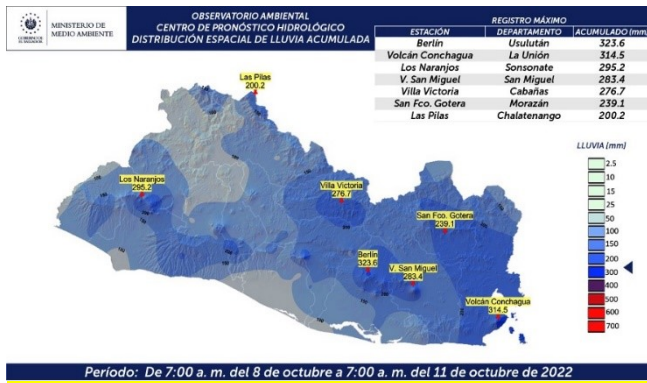


Fig. 3. Mapas de lluvia acumulada del evento Julia en El Salvador, de las 07:00 a.m. del 08 de octubre a 07:00 a.m. del 11 de octubre de 2020.

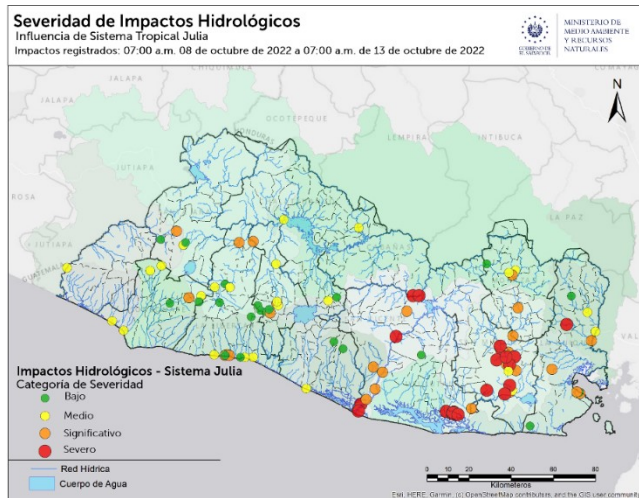


Fig. 4. Distribución espacial de la severidad de los impactos hidrológicos registrados debido a la influencia del Sistema Tropical Julia, entre las 07:00 a.m. del 08-10-2022 a 07:00 a.m. del 13-10-2022.

IV. METODOLOGÍA

La metodología de análisis aplicada, comprende la caracterización de la exposición física en la cuenca RGSM, modelación hidrológica e hidráulica, análisis de la vulnerabilidad física de la infraestructura del tipo residencial y evaluación de pérdidas y daños. Al intersecar las manchas de inundación y el modelo de exposición validado, se identifican los elementos expuestos y se evalúan daños y pérdidas.

El modelo de exposición física parte de la clasificación de tipologías estructurales definidas por HAZUS, divididas por año de construcción. El modelo hidrológico se desarrolló hasta el puente sobre el río Grande en el desvío del Delirio, se modelaron 30 kilómetros lineales de cauce fluvial y se determinaron los caudales del evento Julia de Octubre del 2022, periodo de retorno de 50 años y 100 años.

La modelación hidráulica, se desarrolló con software Iber V3.3.1, software de solución numérica por elementos finitos, con enfoque bidimensional,

obteniendo diversas variables hidráulicas, entre las que podemos mencionar: altura de calado, velocidad de flujo, mapas de peligrosidad, mancha de inundación, entre otros. Como datos de entrada se utilizó el modelo de elevación digital del terreno de El Salvador del año 2014 (T. Chavez, 2014), mapa de uso de coberturas de suelo de El Salvador 2015-2016 generado a partir de imágenes rapideye, mapa del coeficiente de Manning, generado en este estudio, y los caudales calculados en la modelación hidrológica.

Todo el proceso se auxilió de fotografías aéreas e imágenes satelitales que contribuyeron a la verificación de áreas de inundabilidad. Además, se realizaron visitas a campo para identificar los puntos de máxima inundabilidad. Dichos puntos se ubicaron considerando la información proporcionada por los habitantes de los sitios visitados, en otros casos, se ubicaron a partir de las evidencias de las crecidas e impactos en la infraestructura existente ubicada en la planicie de inundación del evento Julia 2022.

Además de la identificación de las máximas crecidas, en campo se realizó el reconocimiento de las tipologías estructurales predominantes en las áreas afectadas por inundaciones a fin de validar para el área de estudio, las tipologías estructurales del modelo de exposición, seleccionar curvas de daño por inundación e identificar funciones de colapso estructural.

V. EXPOSICIÓN FÍSICA Y VULNERABILIDAD

A. Distribución de edificios por portafolio y tipología

Debido a que no se cuenta con una base de datos de edificaciones, se efectuó un proceso de digitalización de edificios haciendo uso del producto de la DOA de elevaciones generadas a partir del vuelo Lidar 2014 y del servicio gratuito del CNR de catastro (<http://cloud.cnr.gob.sv/arcgis/rest/services/SVWGS84/06/MapServer>). A partir de las tipologías definidas por HAZUS, metodología de modelamiento del riesgo desarrollado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA), se procedió a clasificar la infraestructura digitalizada considerando las 25 tipologías estructurales identificadas por López y Chávez (2020), para el modelo de exposición física de El Salvador.

A cada edificación se le asignó altura del edificio, tipología estructural, año de construcción, valor del activo expuesto, ocupantes de día y de noche. La información generada sirvió para inferir en proyecciones de número de edificios por portafolio, asignadas a través de código Python en ArcGis y

rectificadas posteriormente de manera manual. Dentro del área de estudio se cuenta con un total de 98,734 edificaciones de las cuales el 90.91% corresponden al sector residencial. La tipología estructural con el mayor número de elementos expuestos es la mampostería reforzada (RM2L), seguida por la mampostería confinada de barro (RMC), dicha distribución se puede apreciar en la Figura 5.

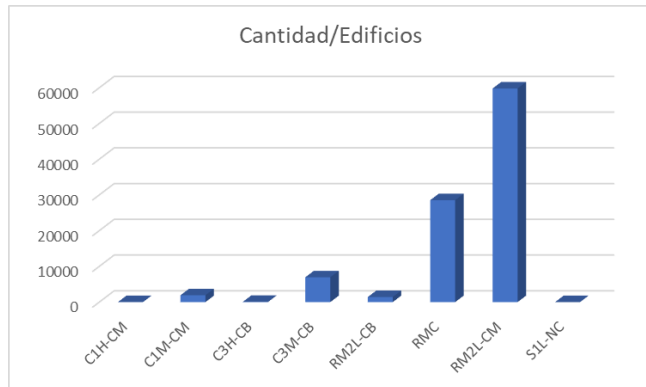


Fig. 5. Número de viviendas y edificios expuestos en la ciudad de San Miguel. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

B. Proceso de caracterización de exposición física

Como parte del proceso de la recolección de información de tipologías estructurales, se observó que, en las zonas urbanas ubicadas al norte del puente de Moscoso, la mayor cantidad de viviendas son de adobe.



Fig. 6. Tipología típica de la casa de adobe en San Miguel. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

En las zonas urbanas, se identificaron como tipologías estructurales predominantes las de mampostería confinada y mampostería de bloque de concreto.



Fig. 7. Tipología de la vivienda de mampostería reforzada. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

C. Vulnerabilidad de la infraestructura tipo vivienda

1) Consecuencias asociadas a inundaciones

Los daños y pérdidas asociados en procesos de inundabilidad, corresponden principalmente a los impactos en el menaje de las viviendas, que dependen de la profundidad del calado y de la velocidad del flujo. Ya que en la medida en la que la profundidad de la inundación y la velocidad del flujo aumenta, las afectaciones serán mayores.

Los daños y pérdidas en la infraestructura tipo residencial, dependen de las características de la amenaza y de la infraestructura. En las visitas a campo se evidenció que, con respecto a las viviendas de mampostería confinada, las viviendas de adobe poseen mayor vulnerabilidad a sufrir colapso, al ocurrir inundaciones.

En la figura 8, se muestra una vivienda de adobe, colapsada. El comportamiento se debe a que este tipo de sistema constructivo es frágil ante la imposición de fuerzas laterales ubicadas fuera del plano. También se ha observado que en los procesos de inundación las viviendas de adobe pierden la capacidad de soportar esfuerzos de corte.



Fig. 8. Vivienda de adobe colapsada. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Las construcciones de mampostería confinada tienen mayor resistencia a las fuerzas impuestas por el agua. No se evidenciaron daños estructurales, arquitectónicos o pérdidas totales del menaje en las

viviendas que estuvieron expuestas a calados de agua de 2 metros (Figura 6). Otro ejemplo de ello se observa en la figura 8, donde la pared que fue construida con mampostería de bloque de concreto, permaneció sin daño, a diferencia del resto de la casa de adobe.



Fig. 9. Vivienda de mampostería confinada inundada. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

2) Potencial de colapso de viviendas

Entre las acciones mecánicas impuestas por el tránsito de avenidas en zonas de llanuras de inundación con exposición de infraestructura que dañan el contenido de las viviendas y su estructura, se pueden mencionar:

- presiones hidrostáticas sobre los muros, generadas por la fuerza que ejerce la altura de calado,
- golpes de objetos o escombros que flotan en el flujo y
- la velocidad que deriva en acciones mecánicas adicionales en los muros de las viviendas,

De las tres acciones mencionadas, la velocidad del flujo constituye un agravante mayor en daños de la estructura y menaje de viviendas. Asimismo, genera daños en la cimentación por erosión local, detonando procesos de colapso de la vivienda, tal y como se muestra para la mampostería confinada en la figura 10 (USACE, 1985).

Como parte del proceso de análisis, se realizaron cálculos de potenciales colapsos en viviendas para eventos con períodos de retorno de 100 años empleando las curvas desarrolladas por la USACE, para el distrito de Portland en 1985. Estas curvas están en función de la altura de calado y la velocidad de flujo (figura 10 y 11).

La línea en anaranjado de las figuras 10 y 11, muestra la frontera que indica el potencial colapso de una vivienda en función del calado y la velocidad de flujo. El colapso en viviendas de mampostería considerando la exposición existente refleja un total de 2 viviendas con potencial de colapso de

presentarse un calado igual o mayor a 4 metros con velocidad de flujo mayor a 2 m/s. Sin embargo, en las viviendas de adobe el número potencial de viviendas se ve incrementado a profundidades de calado mayores a 3 metros o velocidades de flujo mayores a 1.5 m/s.

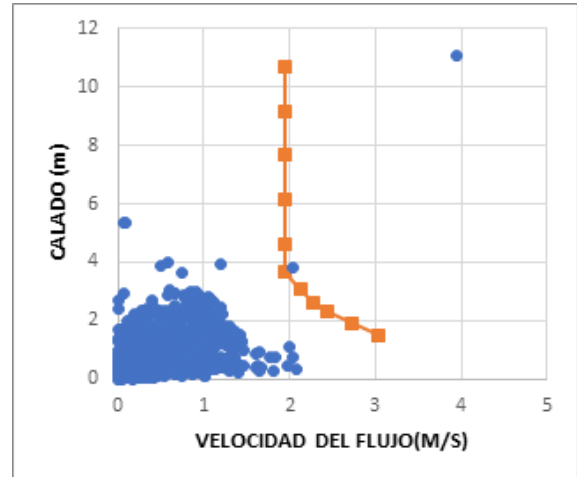


Fig. 10. Gráfico del potencial colapso de viviendas de mampostería para un periodo de retorno de 100 años. Fuente: (USACE, 1985)

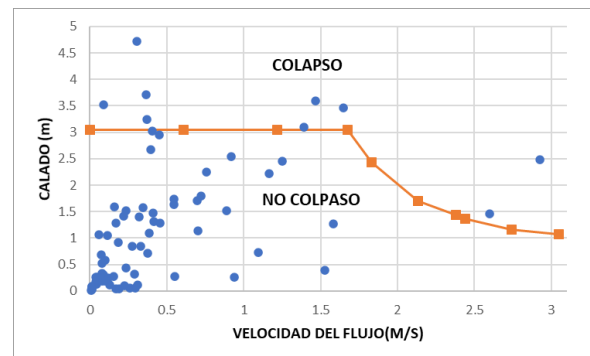


Fig. 11. Curvas de colapso en viviendas de adobe. Fuente: (USACE, 1985)

Posterior a la ocurrencia de Julia en octubre de 2022, en las visitas realizadas a campo, se reconocieron 10 viviendas colapsadas de adobe en la parte norte de la zona de estudio, dicho dato es coherente con las gráficas mostradas.

VI. MODELO DE INUNDABILIDAD PARA LA TORMENTA JULIA

A. Modelación hidrológica

1) Modelo de lluvia

Para el modelo de lluvia se utilizaron los registros de lluvia de 13 estaciones telemétricas para los 4 días que duró el evento, los cuales se encuentran almacenados en la base de la Gerencia de Hidrología del Observatorio de Amenazas del Ministerio de Medio Ambiente.

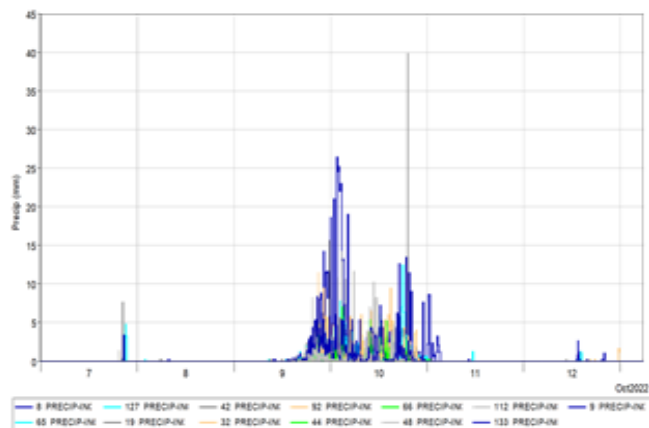


Fig. 12. Registro de lluvia estaciones evento de Julia, octubre 2022, desde las estaciones telemétricas de MARN. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

El evento meteorológico de Julia dejó acumulados máximos en la zona oriental de 323.6 mm en el lapso de 72 horas. Zonas que se encuentran dentro del área estudio, como lo estación de San Francisco Gotera y volcán de San Miguel registraron acumulados de 239.1 mm y 283.4mm.

Para el modelo, el tránsito de la avenida en el cauce fluvial fue estimado aplicando el método de Muskingum, desarrollado por el Servicio de Conservación en Ohio, Estados Unidos.

2) Mapa de número de curva

Las simulaciones hidrológicas emplearon el modelo HEC-HMS para crear el modelo lluvia-escorrentía. Para ello, en primer lugar, se calculó el número de curva CN aplicando la metodología elaborada por SCS, por ser una aproximación adecuada de la escorrentía superficial (Kent, 1968; SCS, 1972) que permite obtener la escorrentía superficial acumulada desde el comienzo de la lluvia (Azagra, 1995).

En este método se clasifica el número de curva versus la escorrentía superficial producida, en función del uso de suelo y cuatros grupos hidrológicos del suelo. Los grupos hidrológicos son determinados en función de la textura del suelo y considerando el Triángulo de Clasificación de Suelo del Departamento de Agricultura de Estados Unidos USDA. Y para considerar los efectos de la pendiente en el número de curva se emplea la tabla propuesta por Villacorta (2013).

Dicho proceso se realizó haciendo uso el mapa de cobertura de suelo de El Salvador 2015-2016, el mapa de pendiente clasificado en pendientes menores a 3% y mayores a 3%, el modelo de elevación digital de suelo LIDAR 2014 (T. Chávez, 2014) y el modelo de textura de suelo generado en el mapeo digital de suelos de El Salvador el Salvador 2021 (Grupo Gestor,

2021). Los datos de textura fueron utilizados para determinar los grupos hidrológicos del suelo. En los casos en los que existían vacíos de información se aplicó un proceso de inferencias de datos utilizando un algoritmo de vecino más cercano. Con la tabla propuesta se desarrolló un código capaz de determinar el número de curvas a nivel nacional de forma automática. Dado que se contaba con los datos suficientes, se generó el mapa de curva para todo El Salvador a una resolución de 2.5 metros, y luego se extrajo el área de interés.

En la figura 13 se puede observar que las zonas de carácter urbano, humedales y manglares son áreas con números de curva mayores y como es de esperarse, corresponden a zonas con mayor escorrentía superficial. Al contrario, la zona montañosa norte y la cadena volcánica central posee números de curva bajos, por lo tanto, mayor potencial a infiltración.

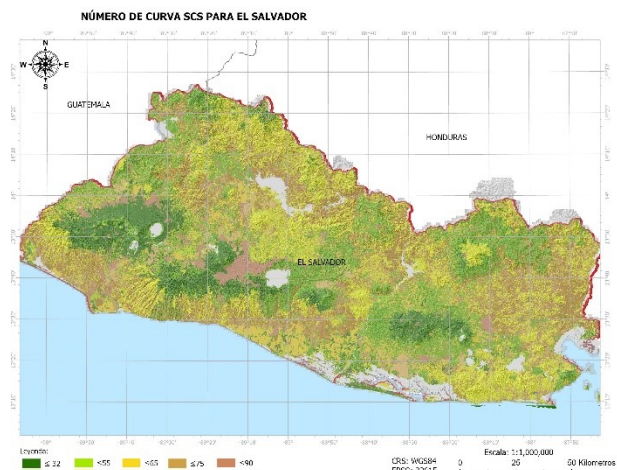


Fig. 13. mapa de número de curva de El Salvador. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN, 2024.

3) Tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento

El tiempo de concentración, está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida el agua ubicada en el punto más alejado de la cuenca. Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento representa el retardo que la cuenca le impone a la escorrentía superficial para desplazarse, simulando el comportamiento de la cuenca como si fuese un depósito lineal, en el cual un aumento de caudal de entrada se refleja en un caudal de salida retardado (Elizondo, 2018)

El tiempo de concentración se estimó en función de: longitud más larga del cauce, pendiente media del cauce, pendiente media de la cuenca. pendiente del cauce 10-85, longitud del cauce 10-85 considerando los métodos de cálculo de Kirpich, Ve t. Chow,

Ventura Heron, SCS. Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento se calculó aplicando la ecuación planteada por Clark. La cuenca en estudio fue segmentada en 11 subcuencas tal y como se muestra en la figura 14 y para cada una de ellas se calcularon el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento según se muestra en la tabla 1.



Fig. 14. modelo matemático y parteaguas de la región hidrográfica de parte de la cuenca del río Grande de San Miguel. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Tabla 1: Tiempos de concentración y coeficiente de almacenamiento. Elaboración propia

| Cuenca | TC(SCS, hr) | TC(V.T CHOW, hr) | TC(Ventura-Heron, hr) | TC(Kirpich, hr) | TC(promedio, hr) | R (hr) |
|--------|-------------|------------------|-----------------------|-----------------|------------------|--------|
| Sb11 | 20.40 | 10.99 | 19.04 | 19.74 | 17.54 | 0.95 |
| Sb10 | 7.93 | 4.16 | 7.00 | 6.13 | 6.30 | 1.35 |
| Sb9 | 2.16 | 2.32 | 3.51 | 3.04 | 2.76 | 1.32 |
| Sb8 | 5.60 | 4.66 | 8.52 | 7.03 | 6.45 | 1.04 |
| Sb7 | 2.39 | 1.69 | 2.95 | 2.07 | 2.27 | 1.22 |
| Sb6 | 0.58 | 0.56 | 0.81 | 0.56 | 0.63 | 1.46 |
| Sb5 | 3.47 | 2.19 | 3.77 | 2.83 | 3.06 | 1.43 |
| Sb4 | 7.89 | 3.55 | 7.03 | 5.06 | 5.88 | 1.36 |
| Sb3 | 2.26 | 1.54 | 2.67 | 1.86 | 2.08 | 1.44 |
| Sb2 | 2.35 | 2.01 | 3.46 | 2.55 | 2.59 | 1.44 |
| Sb1 | 3.42 | 1.90 | 3.74 | 2.39 | 2.86 | 1.41 |

Se observa que la subcuenca 6 presenta un tiempo de concentración pequeño indicando con ello que dicho elemento posee la capacidad de concentrar caudales de manera rápida, menos de 1 hora; al contrario de la subcuenca 11, cuyos tiempos de concentración están relacionados con la topografía llana de la zona.

Con las variables planteadas de morfometría y morfología, se estiman los valores necesarios que permitan estimar el comportamiento físico hidrológico de la cuenca en análisis.

4) Cálculo de caudales

El hidrograma de caudales resultante del evento de Julia, como se puede observar en la figura 7, se determinó en 1,474 m³/s, con una duración estimada

de día y medio. Este producto es parte esencial para efectuar cálculos de hidráulica fluvial. Se debe tomar en cuenta que el caudal estimado, no considera el caudal base en el cálculo hidrológico presentado. Por lo que el caudal estimado en esta investigación representa un valor inferior al real.

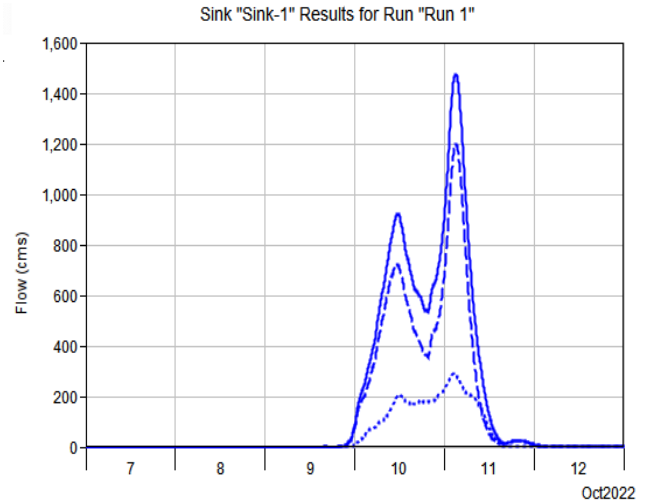


Fig. 15. Hidrograma de caudales modelado para evento Julia 2022. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

5) Curvas intensidad-duración-frecuencia

Para estudiar las consecuencias de eventos extremos con periodos de retorno de 50 y 100 años, se realizó la modelación hidrológica de la cuenca del río Grande, hasta el punto de interés. Como parte del proceso se derivaron las curvas IDF, empleando los datos de precipitaciones máximas absolutas de estaciones convencionales ubicadas en las zonas de interés del proyecto: Cacahuatique, Corinto, Pasaquina, Polorós, San Francisco Gotera, San Miguel UES, Sessori.

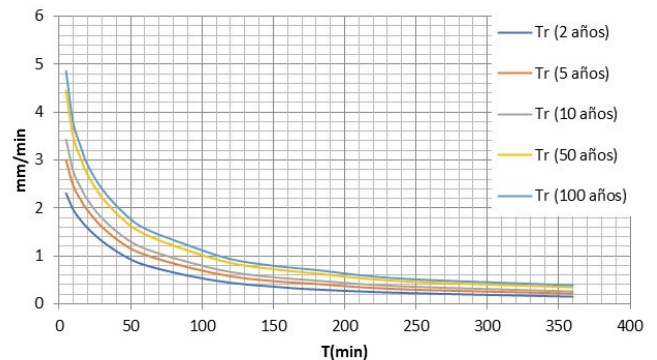


Figura 16. Ejemplo de las curvas intensidad duración frecuencia IDF de las estaciones de influencia en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Para cada una de las estaciones meteorológicas, se determinaron las curvas IDF y además las ecuaciones que las representan. Con el fin de idealizar una tormenta tipo, se definió una tormenta con un

tiempo de duración de dos horas, lo más cercano a los tiempos de concentración de cada una de las microcuencas discretizadas. Con dicho proceso se procedió a construir hietogramas de bloques alternos, para cada uno de los periodos de retorno establecidos.

Hietograma precipitación T100

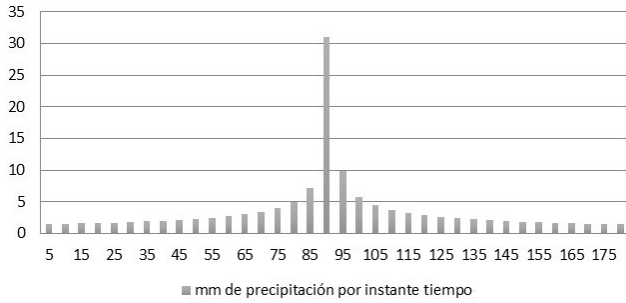


Fig. 17. Ejemplo del hietograma de tormenta analizada. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Los resultados de la modelación hidrológica generaron hidrogramas de caudales hasta el punto de interés. El caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años se estimó de 2,193 m³/s y de 1894.6 m³/s para el periodo de retorno de 50 años.

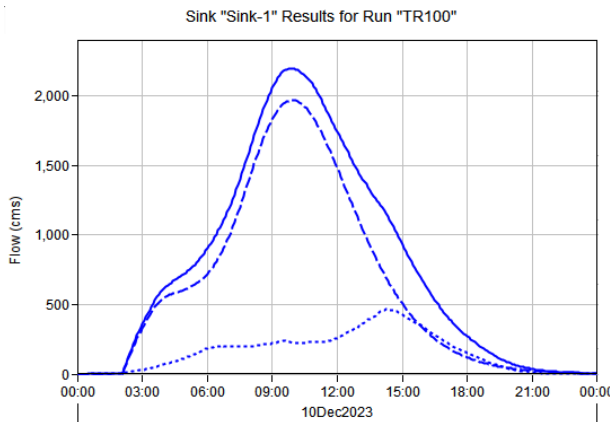


Figura 18. Hidrograma de caudales para un periodo de retorno en puente El Delirio. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

El caudal hidrológico determinado para el periodo de 100 años del presente documento se asemeja mucho al hidrograma de caudales de la investigación realizada por la cooperación japonesa JICA en el año de 1997, denominado "Control integral de crecidas en el río Grande de San Miguel en la república de El Salvador". En dicho estudio se estimó un caudal de 2,100 m³/s, para un periodo de retorno de 50 años, con una diferencia de 202.4 m³/s. Estas diferencias podrían asociarse al caudal base no considerado en la presente investigación, el caudal base estipulado por JICA fue de 200 m³/s.

B. Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó con el software Iber V3.3.1, modelo numérico de elementos finitos, fundamentado en las ecuaciones 2D de Saint Venant.

El análisis de velocidad de flujo se realizó promediando la altura total de calado. Para ello se generó, a partir del modelo digital de elevación de 1 metro de resolución y del mapa de coberturas 2015-2016; un ráster del coeficiente de Manning a 2.5 metros de resolución espacial.

Luego, se efectuó la modelación hidráulica bidimensional considerando los escenarios de la tormenta Julia y los periodos de retorno de 50 y 100 años. Los resultados obtenidos en la modelación se asemejan a la ubicación de los puntos de máxima crecida recolectados en campo. En la figura 19 se aprecian las manzanas urbanas de la ciudad de San Miguel, con los puntos de máxima crecida levantados en campo, junto a la mancha de inundabilidad modelada.



Fig. 19. Modelo de inundabilidad en colonia Carrillo y Jardines del Río. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

La presión del cambio de uso de suelo sobre las llanuras de inundación y llanuras aluviales del río Grande de San Miguel, han aumentado la exposición de infraestructura tipo residencial en la zona.

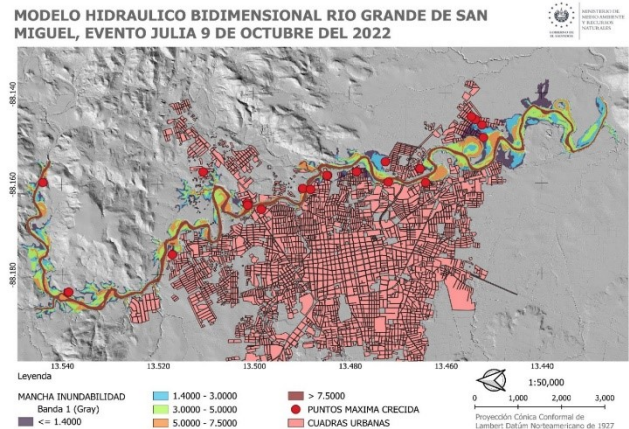


Fig. 20. Inundabilidad del evento de Julia. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

1) Modelación hidráulica periodos de retorno de 50 y 100 años

Como parte de los ejercicios para la identificación de vivienda expuesta a procesos de inundación en el río Grande de San Miguel, se efectuó la modelación hidráulica bidimensional en Iber en un total de 34 kilómetros. Con respecto a la modelación realizada por JICA (1997), se observa que mancha de inundabilidad modelada en este estudio, cubre mayor área en las zonas de como la Colonia Carrillo y Vistas del río. Lo anterior puede estar relacionado con los cambios de suelo que ha sufrido la cuenca y que han influenciado su capacidad de infiltración.

inundaciones modelada y real. Con estas medidas se estimó el Error Absoluto Porcentual Medio (MAPE).

$$MAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|$$

Los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 2, el MAPE de las 17 secciones transversales obtuvo un valor de 3.52%, demostrando que los coeficientes de Manning distribuidos seleccionadas son adecuados para el tramo en estudio y un claro indicativo que los caudales modelados para el evento meteorológicos son aceptables.

En la tabla 2, se evidencian dos secciones con una alta variabilidad de error relativo porcentual (RPE), en las cotas de calado. Referente a la sección 5 con un RPE DE 9.48%, vale la pena mencionar que se trata de una sección con un alto encajonamiento del cauce y la alta cobertura vegetal.

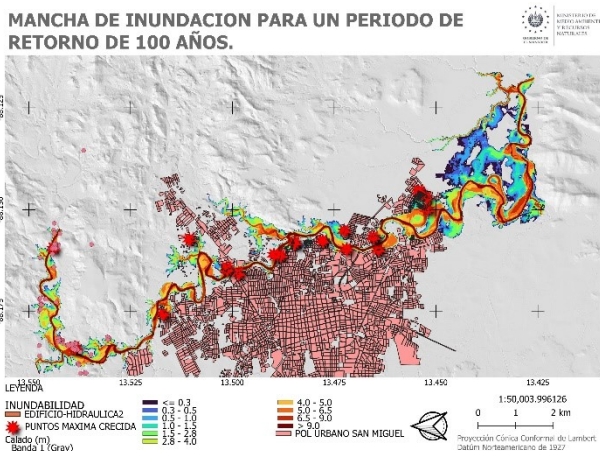


Fig. 21. mancha de inundación periodo de retorno de 100 años. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

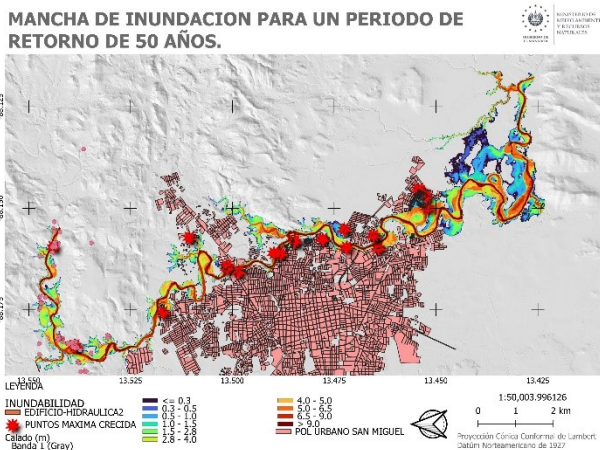


Fig. 22. mancha de inundación periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

C. Evaluación del error del modelo hidráulico

Para estimar el error del modelo hidráulico generado, se obtuvieron las cotas de máximo calado modelado y se compararon con respecto a los recolectados en campo. Las cotas de calado máximo, se extrajeron de 17 secciones transversales topográficas, que fueron generadas a partir de las manchas de

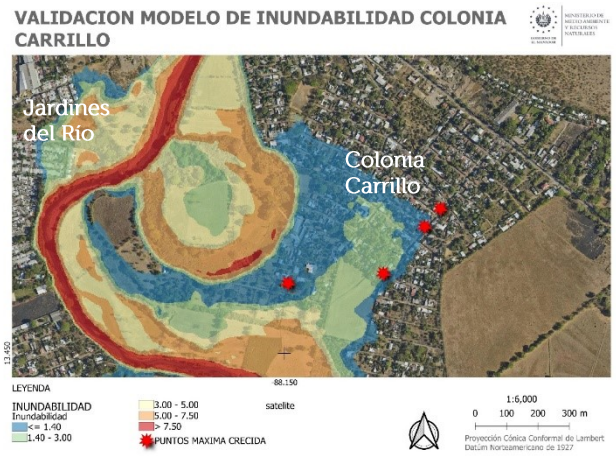


Fig. 23. Modelo de inundabilidad en colonia Carrillo y Jardines del Río. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

En la figura 24, se observa un ejemplo de la altura de calado alcanzada en una vivienda localizada en la colonia Carrillo, para el evento de Julia. Los sedimentos presentes en el agua, dejaron evidencia de la máxima cota alcanzada de 2 metros. El modelo hidráulico para el evento de Julia reflejó una altura de calado de 1.84 metros ese punto, una diferencia de 16 centímetros de calado de agua con respecto al modelo hidráulico.

Tabla 2: Valores de las alturas de calado modelado y real, con su respectivo RPE. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

| ITEM | SECCION | Máximo Calado modelado (m) | Máximo Calado real (m) | Error-relativo (%) |
|------|------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | Sección 1 | 9.65 | 9.58 | 0.73% |
| 2 | Sección 2 | 10.11 | 10.49 | 3.62% |
| 3 | Sección 3 | 10.75 | 12.15 | 11.56% |
| 4 | Sección 4 | 12.21 | 12.31 | 0.81% |
| 5 | Sección 5 | 10.60 | 11.71 | 9.48% |
| 6 | Sección 6 | 11.53 | 11.61 | 0.61% |
| 7 | Sección 7 | 12.34 | 12.76 | 3.29% |
| 8 | Sección 8 | 13.76 | 12.93 | 6.42% |
| 9 | Sección 9 | 12.39 | 11.73 | 5.64% |
| 10 | Sección 10 | 11.03 | 10.97 | 0.55% |
| 11 | Sección 11 | 12.34 | 11.73 | 5.20% |
| 12 | Sección 12 | 12.58 | 12.31 | 2.19% |
| 13 | Sección 13 | 9.58 | 9.45 | 1.38% |
| 14 | Sección 14 | 11.11 | 11.28 | 1.51% |
| 15 | Sección 15 | 11.84 | 11.37 | 4.11% |
| 16 | Sección 16 | 11.32 | 11.18 | 1.22% |
| 17 | Sección 17 | 11.74 | 11.91 | 1.44% |

Además, con los datos de los máximos calados modelados y reales, se estimó el Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE), con este dato se tendrá la variabilidad numérica del modelo hidráulico.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

El cálculo realizado, proporcionó un RMSE para todo el modelo hidráulico de 0.57 metros de altura de calado.

VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para realizar la calibración del modelo hidráulico e hidrológico de máxima crecida, se visitaron más de 100 puntos, de los cuales 17 resultaron con inundaciones en el evento de Julia 2022. Los resultados señalan que las colonias más afectadas para el evento hidrometeorológico Julia fueron: caserío Los Miranda, comunidad Agua Zarca, colonia Las Violetas, colonia Dolores, colonia Santa Luisa, colonia 15 de septiembre, colonia Prados de San Miguel, colonia Brisas del Río y colonia Carrillo (figura 20).



Fig. 24. Registro de máxima crecida en vivienda de mampostería reforzada. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

A partir del modelo de exposición digitalizado y a lo largo de los 30 kilómetros de río analizados, se contabilizaron un total de 1513 viviendas (fig. 25), afectadas por el evento de Julia. La mayoría de las viviendas afectadas se ubican en la colonia Carrillo y Jardines del Río. El mayor número de viviendas corresponde a la tipología del tipo mampostería de block reforzado RM2L, con un total de 672 viviendas, seguido por las viviendas de mampostería confinada de un nivel con un total de 571 unidades, el tercer grupo es ocupado por las viviendas de adobe con 116 unidades.

Se logró comprobar en campo que las viviendas de adobe son vulnerables a sufrir colapso en procesos de inundación. Lo anterior debido, entre otras razones, a la pérdida de resistencia al corte ante la sobresaturación de los bloques de tierra no reforzadas.



Fig. 25. Modelo de inundabilidad en colonia Carrillo y Jardines del Río. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Para 100 años de periodo de retorno, se contabilizaron en el modelo de exposición, 2260 viviendas, ubicándose el mayor número de ellas, en las colonias Carrillo y Jardines del Río. El mayor número de viviendas expuestas corresponden para las RM2L con un total de 1068 viviendas expuestas, seguida para las viviendas de mampostería confinada con un total de 861 viviendas. Como se puede apreciar en la figura 26, el área inundada para la colonia Carrillo es mayor, que para el evento Julia,

pero corresponde a cotas de inundación inferiores a los 5.

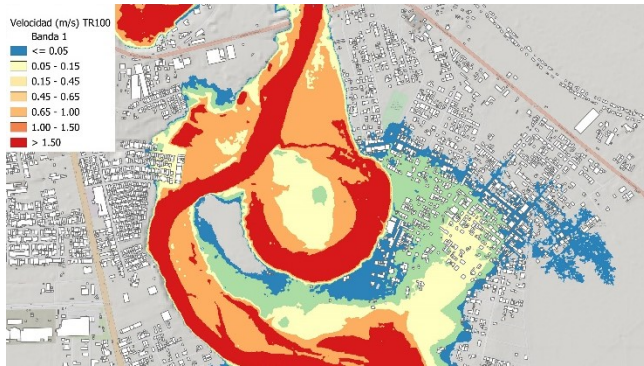


Fig. 26. Modelo de inundabilidad en colonia Carrillo y Jardines del Río Grande para un periodo de retorno de 100 años. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

Entre los impactos asociados a inundaciones en viviendas, se tienen los daños y pérdidas del menaje de cada una de las viviendas expuestas. Además de, los daños estructurales asociados a la fuerza hidrostática y procesos de socavación local en los elementos estructurales.

Con el fin de estimar el daño asociado a procesos de inundación, se emplearon las curvas de vulnerabilidad de viviendas tipo III, de la "Guía Básica para Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Fenómenos Hidrometeorológicos, Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED), 2006).

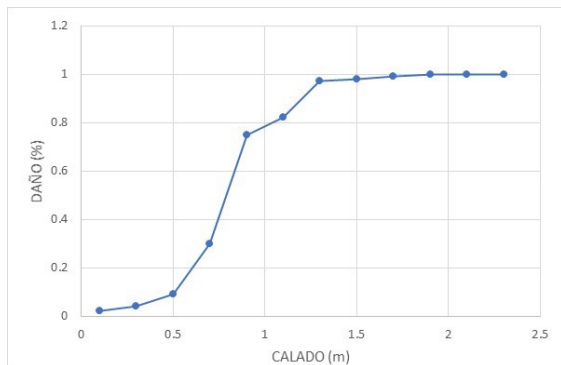


Fig. 27. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo III. Fuente: Guía Básica para Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Fenómenos Hidrometeorológicos, Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED), 2006), pagina 63.

Al valorar los daños asociados a una inundación con un periodo de retorno de 100 años, se observa que parte de la colonia Carrillo y Jardines del Río, sufren un daño de casi el 100% en infraestructura (fig. 28). A fin de realizar una valoración que mejor represente la realidad salvadoreña, se vuelve necesario desarrollar

curvas de vulnerabilidad acopladas que consideren los testimonios de personas afectadas en estos sitios.

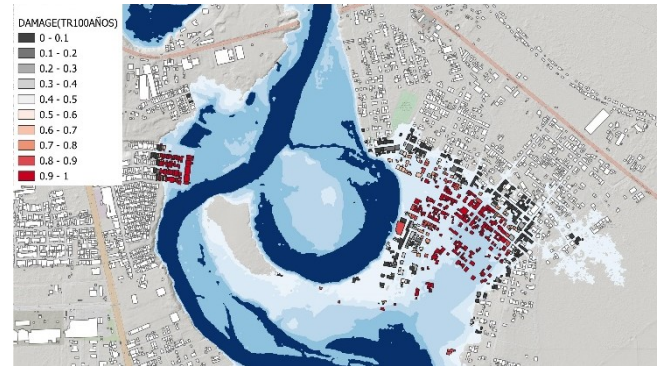


Fig. 28. Daños por inundación en Colonia Carrillo y Jardines del Río para un periodo de retorno de 100 años. Fuente: elaboración propia, DOA-MARN.

No se observaron daños asociados a la arquitectura o estructurales, en los tipos de viviendas, tipo RM2L y RMC. A diferencia de las viviendas de adobe expuestas a calados de agua mayores a más de 1 metro.

La ciudad de San Miguel, posee una expansión urbanística, que está cambiando el uso del suelo, afectando en algunos casos y de manera directa el comportamiento hidrológico de la cuenca, por incremento de la escorrentía superficial.

REFERENCIAS

- DOA/MARN (9 de agosto de 2023). Registro histórico de inundaciones. <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/select.php?dpt=12&okBtn=Ok>
- DOA/MARN (2022). Informe hidrológico para CTC. Influencia del Sistema ciclónico Julia. Salvador
- DOA-MARN (s.f.). Descripción general. Sistema de Alerta temprana por inundaciones. Cuenca del Río Grande de San Miguel. San Salvador.
- Equipo Humanitario de El Salvador, 2022. El Salvador: Tormenta Tropical Julia. Informe de Situación NO. 1. Al 1 de octubre de 2022.
- Elizondo, G. (2018). Ajuste del número de curva mediante optimización en HEC-HMS en la microcuenca La Vegan en el Valle del Cauca, Colombia. [Tipo de tesis para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola]. tecnológico de Costa Rica.
- Gallegos-Reina, A. J. (2022). Cambio en los patrones territoriales y análisis de inundabilidad y erodabilidad en cuencas de la provincia de Málaga, España (1956-2010).
- Gallegos Reina, A., & Perles Roselló, M.ª J. (2019). Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957-2007). Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 81, 2740, 1-38.
- González Fadrique, A. (2019). Estudio de inundabilidad de la finca de Santa Leocadia en Cillorigo de Liébana.
- Herzer, H., y Gurevich, R. (1996). Construyendo el riesgo ambiental en la ciudad. Desastres y sociedad, 4(7), 1-15.
- JICA (1997). El Estudio de Control Integral de Crecidas en el Río Grande de San Miguel en la República de El Salvador. Informe Principal. Tokyo.

- Kent M. (1968). A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds. U.S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. SCS-TP-149. 63 pp. United States.
- MARN (8 de noviembre de 2023). Sistema de información hidrológica - SIHI. Recuperado de: <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/>
- MARN, 2018. Mapa de cobertura de suelos 2015-2016. San Salvador
- MARN, 2017. Plan nacional de gestión integrada del recurso hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias. San Salvador, El Salvador.
- Muñoz, H. M., Vélez, J. L. G., & Parra, D. F. (2006). Modelación hidrológica e hidráulica aplicada a estudios de inundabilidad en cauces naturales caso de estudio: Urbanización río Nima. Ingeniería de recursos naturales y del ambiente, (5), 27-38.
- Narvéz, L., Lavell, A., & Pérez Ortega, G. (2009). La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos. In La gestión del riesgo de desastres: Un enfoque basado en procesos (pp. 102-102).
- PNUD, 2010. Evaluación del riesgo de desastres. recuperado de: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/es/Reduci%C3%B3n%20del%20Riesgo%20de%20Desastres%20-%20Evaluaci%C3%B3n%20del%20Riesgo.pdf>
- Protección Civil (09-10-2022). Comunicado en el marco del Estado de Emergencia Nacional por el huracán JULIA 09/octubre/2022. Recuperado de: <https://www.proteccioncivil.gob.sv/2022/10/09/comunicado-en-el-marco-del-estado-de-emergencia-nacional-por-el-huracan-julia-09-octubre-2022/>
- Renders, Adriel (2022). Informe hidrológico para-CTC. Influencia del sistema ciclónico Julia. Del 08 de octubre al 11 de octubre de 2022.
- SNET, 2005. Estudio territorial subregión San Miguel. San Salvador. Soil Conservation Service (SCS). 1964. Hydrology. Part I. Watershed Planning. S.C.S. National Engineering Handbook. Section 4. U.S. Department of Agriculture. Washington DC. 33 pp. United States.
- USACE (1985). Building collapse curve for Wood frame building developed by the USACE.
- Villalobos, M. (2021). Estimación de áreas afectadas por inundaciones utilizando Sentinel 1 en El Salvador. DOA-MARN. San Salvador.