Articulo

Efecto del cambio de uso del suelo sobre el hidrograma de crecida en la microcuenca del cauce 31 de diciembre, Managua

Effects of land use change over de peak hydrograph in the 31 of December microbasin, Managua

Blanco-Chávez, Miguel Enrique

Miguel Enrique Blanco-Chávez
miguel.blanco@piensa.uni.edu.ni
Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua

Revista Arquitectura +
Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua
ISSN-e: 2518-2943
Periodicidad: Semestral
vol. 8, núm. 16, 2023
rvarqui.mas@farq.uni.edu.ni

Recepción: 05 Julio 2023
Aprobación: 27 Septiembre 2023

URL: http://portal.amelica.org/ameli/journal/529/5294780003/

DOI: https://doi.org/https://orcid.org/0000-0002-3138-4209

Autor de correspondencia: miguel.blanco@piensa.uni.edu.ni

Derechos de autor 2023 Universidad Nacional de Ingeniería

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Resumen: El objetivo del presente estudio es estimar los cambios en el hidrograma de la microcuenca del cauce 31 de Diciembre en la Ciudad de Managua para los escenarios de uso de suelo 2018 y proyección del uso del suelo del año 2040 aplicando un modelo hidrológico. Se utilizó para las simulaciones el Sistema de Modelación Hidrológica (HMS) del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) de EE.UU. Se realizó la simulación hidrológica para el cauce 31 de Diciembre con alturas de precipitación para los períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años y el patrón de distribución de la lluvia de la estación Aeropuerto de Managua para los cuartiles uno y dos. Se utilizó el método del Hidrograma Unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para estimar el hidrograma de crecida. Los resultados de las simulaciones indican que podría haber un incremento del 9% en la precipitación efectiva y los caudales máximos de los hidrogramas simulados se incrementarían cerca de 30% como efecto del cambio de uso del suelo en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre, los que podrían representar un posible impacto negativo por inundaciones en las zonas bajas de la microcuenca estudiada.

Palabras clave: Distribución-de-la-lluvia, hidrograma, hietograma, modelos, período de retorno.

Abstract: The aim of this research is to estimate the changes in the hydrographs at the 31 of December micro-watershed in Managua city for the sceneries land use 2018 and the projection of land use to the year 2040, applying a hydrological model. For the simulations it was used the Hydrologic Modeling System (HMS) from de Hydrologic Engineering Center (HEC) from USA. The hydrologic simulation is done for the 31 of December channel with de precipitation depths for return period 10, 25, 50 and 100 years and the rainfall distribution patter from Managua Airport station, for the quartile one and two. In order to estimate the flood hydrograph the Unitary Hydrograph from de Soil Conservation Service (SCS) was used. The results of the simulations indicate that could be an increasing of 9% for the effective precipitation and the maximum discharges from the simulated hydrographs will increase in about 30% as effect of the land use change in the micro-watershed 31 of December, and could represents a possible negative impacts by flooding in the low zones of the micro- watershed studied.

Keywords: Hyetograph, hydrograph, models, recurrence-period, rainfall-distribution.

Introducción

La subcuenca sur del Lago Xolotlán está compuesta por subcuencas de canales pluviales que escurren de Sur a Norte hasta desembocar en el Lago Xolotlán. El avance de las zonas urbanas hacia el sur está sustituyendo las zonas rurales y provocando cambios en la respuesta hidrológica de estas sub-cuencas, disminuyendo la capacidad de infiltración del suelo e incrementando los caudales de crecidas. En el pasado esto ha provocado que algunos tramos de los cauces pluviales inunden zonas densamente pobladas.

Este estudio se enfoca la determinación de los cambios en los hidrogramas de crecidas que la microcuenca podría experimentar, utilizando un modelo hidrológico, datos de precipitación, hidrométrica, e información espacial de la subcuenca Sur del Lago Xolotlán. El modelo seleccionado es el Sistema de Modelación Hidrológica (HMS, por sus siglas en inglés) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica de EE.UU. (HEC, por sus siglas en inglés). Para estimar las pérdidas de precipitación en la cuenca se seleccionó el método del número de curvas de escurrimientos del Servicio de Conservación de Suelos (SCS por sus siglas en inglés), y para transformar la lluvia efectiva a caudales fue seleccionado el método del hidrograma unitario del SCS.

Metodología

Área de estudio

El estudio fue hecho en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre que es parte de la subcuenca sur del Lago Xolotlán en la región del Pacifico de Nicaragua. La microcuenca tiene un área aproximada de 13.34 Km2, está entre las latitudes 11.95° y 12.12° N y las longitudes 86.076° a 86.408° W, ver Figura 1.

Notas de autor

miguel.blanco@piensa.uni.edu.ni

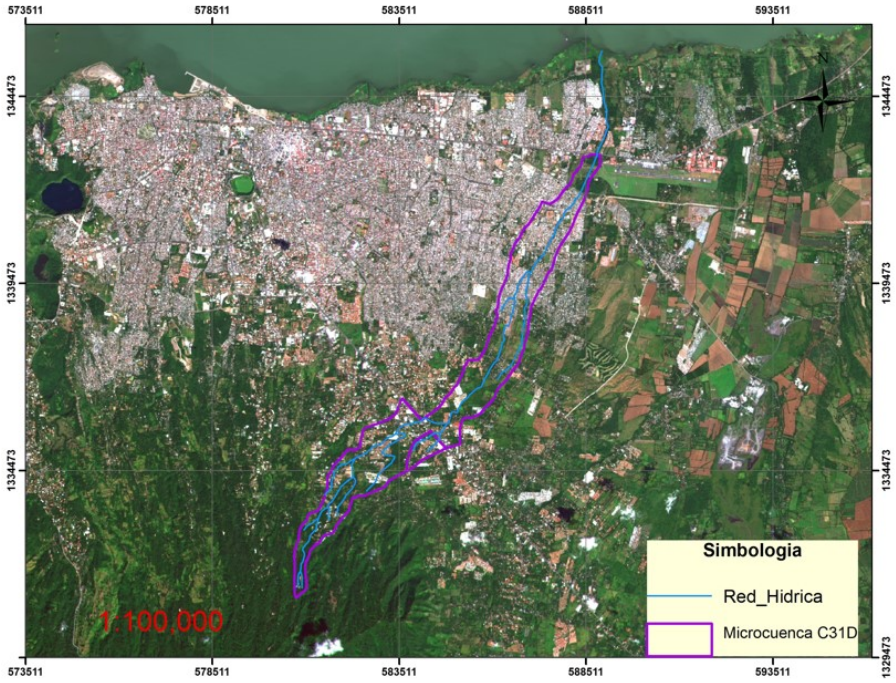

FIGURA 1
Localización de la microcuenca del cauce 31 de Diciembre

En la zona Sur de la microcuenca está la parte más alta, con mayores pendientes y elevaciones que oscilan entre 250 y 600 msnm en una distancia aproximada de 650 m, con pendientes aproximadas entre 5 al 15%; en la zona media, en dirección noreste, las elevaciones varían de 250 a 100 msnm en una distancia de 6060 m, con pendientes aproximadas entre 3 y 5%; en la zona baja de la microcuenca, en el noreste de la microcuenca, las elevaciones varían de 100 a 40 msnm con pendientes aproximadas entre 1 al 2%.

La precipitación promedio anual varía entre 1100 y 1400 mm, incrementándose de Norte a Sur. La temperatura media anual es 25.5°C. La red de drenaje permanece seca la mayor parte del año, únicamente hay corrientes en los períodos de tiempo que hay precipitaciones.

Datos utilizados

Para realizar la simulación con el modelo HMS se utilizaron tres tipos de datos geoespaciales: modelo de elevación del terreno (DEM), mapa de tipos de suelos y mapa de usos de suelos del área de estudio, ver Figura 2.

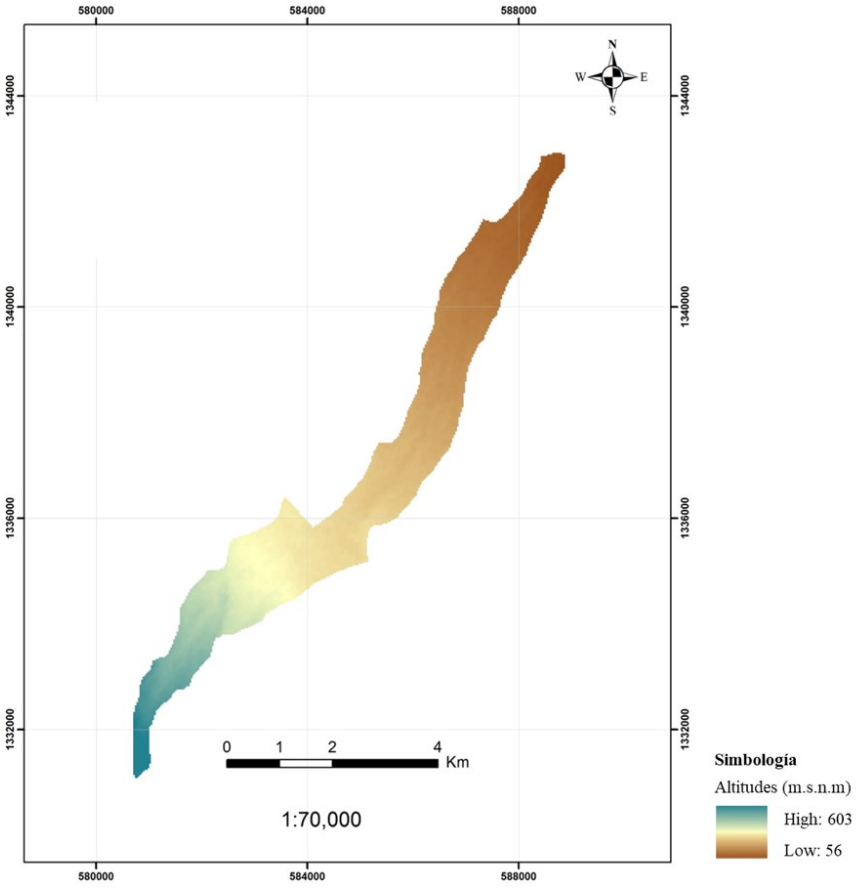

FIGURA 2
Modelo digital de elevación de la microcuenca del cauce 31 de Diciembre.
El DEM utilizado, tiene una resolución espacial de 30 m y fue obtenido del sitio web del Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS) en http://earthexplorer.usgs.gob/.

El mapa de textura de suelo fue obtenido del documento Levantamiento de Suelos de la Región Pacífica de Nicaragua (Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG, 1971), ver Figura 3. El mapa de uso del suelo 2018 fue desarrollado con las imágenes del satélite Land Sat 8, con una resolución espacial de 30 m, Earth Operational Images, Collection 1, TIR sensor, rout 17, row 52 for the scene: LC08_L1TP_01752_20181127_20181211_01_T1, obtenido del USGS (2018).

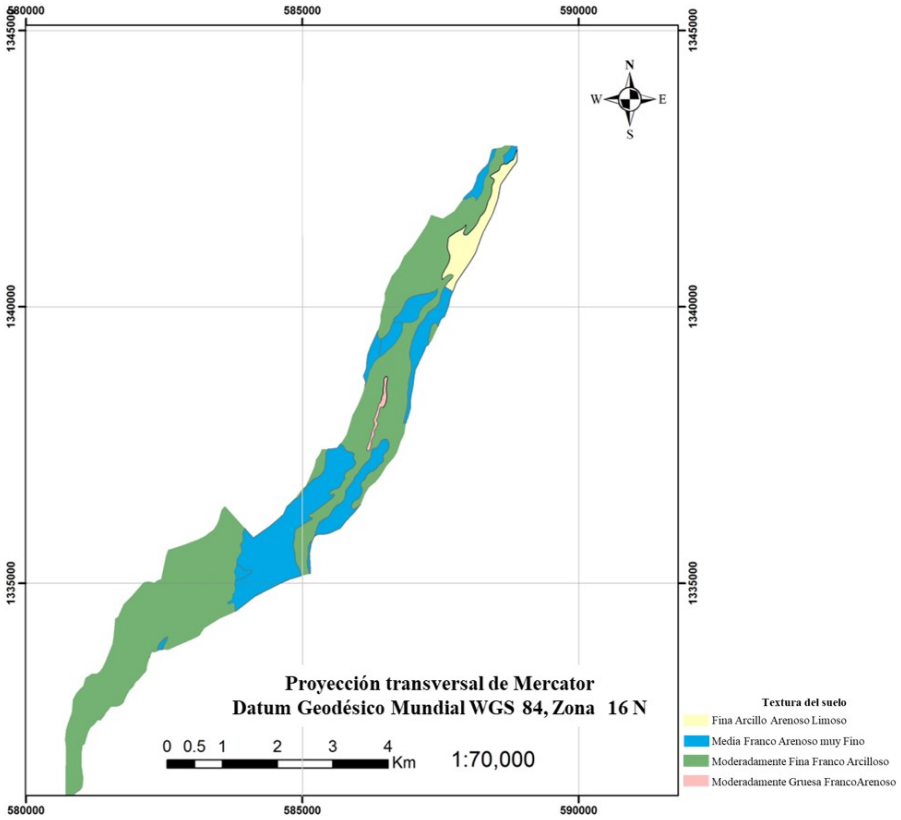

FIGURA 3
Textura del suelo en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre.

En la zona de estudio se definieron cuatro macro clases del uso del suelo para hacer una clasificación supervisada, con el software libre QGIS versión 3.4.7 (QGIS Development Team, 2019) obtenido de http://qgis.osgeo.org, y la aplicación Clasificación Semi-automática (SCP) desarrollado por Congedo (2020). Como resultado de la evaluación de la exactitud de la clasificación del uso del suelo con macro clases, se obtuvo una precisión del 99% y el índice Kappa fue de 0.982, lo que nos indica que la clasificación fue aceptable.

Esta clasificación fue comparada con el Mapa de uso del suelo 2016 (ALMA & JICA, 2017), y nos permitió incluir las subclases. La Figura 4 nos muestra el mapa de uso de suelo para el año 2018 obtenido con este proceso; el punto de cierre de la microcuenca se definió en la intersección del cauce 31 de Diciembre con la carretera norte de la ciudad de Managua.

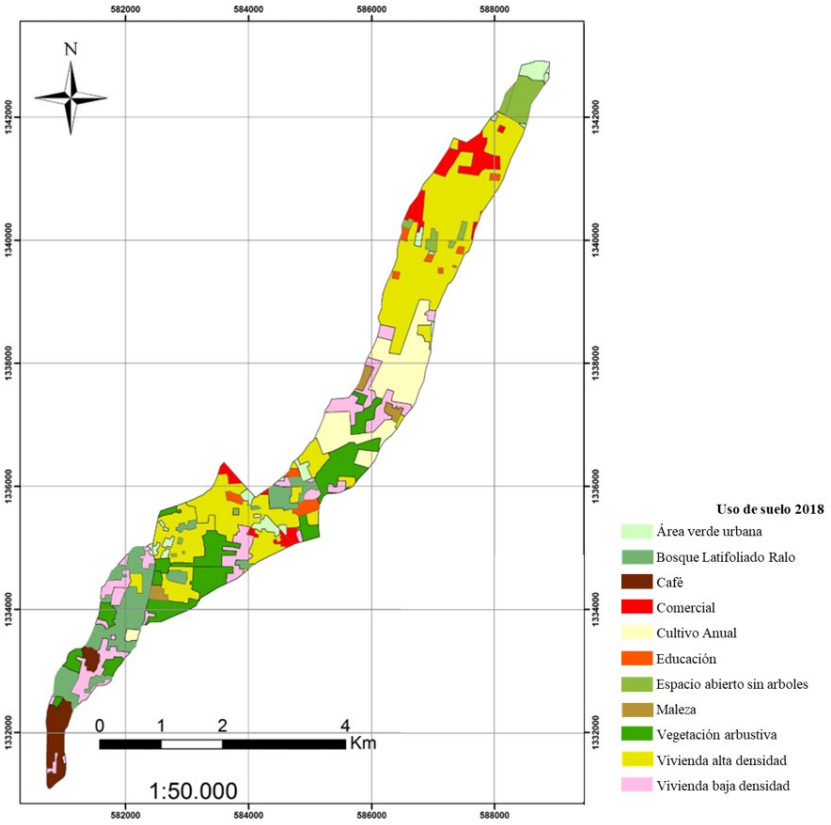

FIGURA 4
Mapa de uso del suelo 2018, en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre.

La Tabla 1 muestra el área ocupada por cada uso del suelo, donde podemos ver que la microcuenca tiene una cobertura de vegetación del 40% del área total, y el área urbana construida es 54.6%. Ha habido una muy fuerte intervención humana en la microcuenca, lo que significa que la condición hidrológica es no muy buena, con menos infiltración de agua en el suelo.

TABLA 1
Aéreas de uso del suelo 2018

Uso del suelo	A (km2)	A%
Bosque	1.81	13.57
Vegetación Arbustiva	1.88	14.09
Área de Cultivos	1.47	11.02
Espacios abiertos sin arboles	0.46	3.45
Área construida Urbana	7.28	54.57
Área verde Urbana	0.44	3.30

Para definir las aéreas del uso futuro del suelo se utilizó la simulación del área construida para el caso optimo al año 2040 (ALMA – JICA, 2017, p. S-39) manteniendo la misma área rural sin afectar; la Figura 5 muestra la proyección de uso futuro para el año 2040

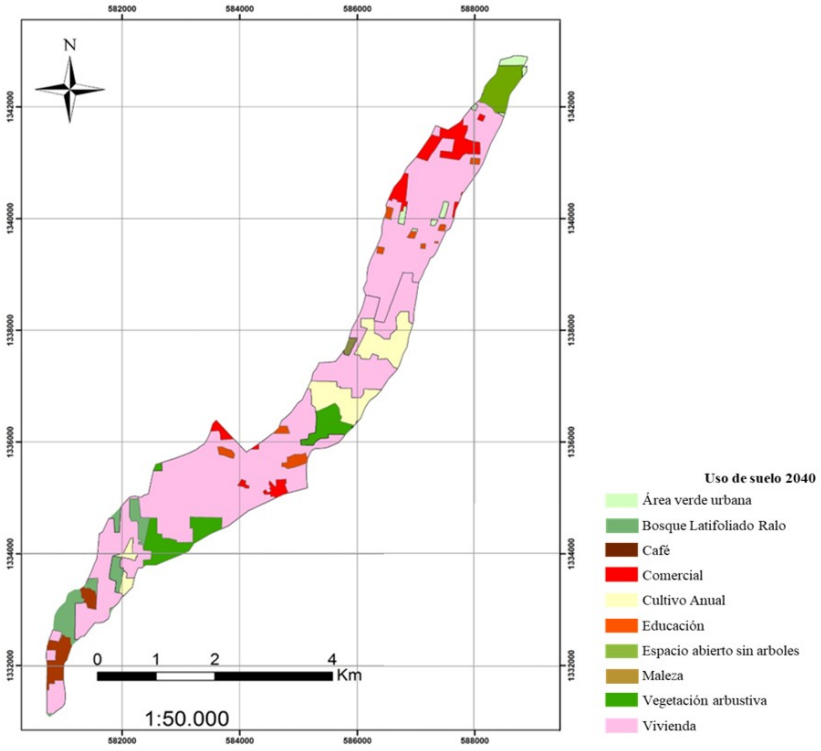

FIGURA 5
Mapa de proyección de uso del suelo 2040, en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre.

La Tabla 2 muestra la proyección del área ocupada para cada uso del suelo en el año 2040, donde podemos ver que el aérea urbana se incrementaría hasta 74% y la cobertura vegetal disminuiría hasta menos del 25% de la superficie de la microcuenca; esto implicaría que la microcuenca cambiaría la condición hidrológica de no muy buena a mala, que podría manifestarse con menos infiltración de agua y una mayor producción de escorrentía superficial.

TABLA 2
Aéreas de proyección de uso del suelo 2040

Proyección de uso de suelo	A (km2)	A%
Bosque	0.90	6.75
Vegetación Arbustiva	0.86	6.45
Área de Cultivos	1.11	8.32
Espacios abiertos sin arboles	0.38	2.85
Área Urbana construida	9.93	74.44
Área Urbana verde	0.16	1.20

Para simular el hidrograma de crecida en la microcuenca con el modelo HMS, se obtuvieron datos de precipitaciones de las estaciones meteorológicas, ver Figura 6.

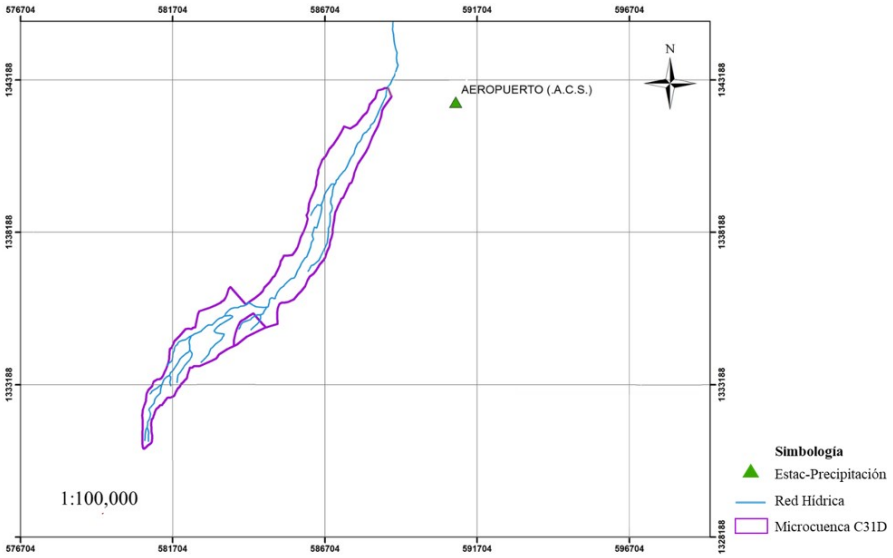

FIGURA 6
Estación pluviométrica en la zona de estudio.

Las precipitaciones fueron obtenidas del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Cerca del área de estudio hay ocho estaciones, cuatro son pluviométricas (PV) y cuatro pluviográficas (PG). La estación pluviográfica con suficientes años de registro de intensidades máximas anuales para que sea estadísticamente válida es la estación Aeropuerto de Managua (código 69027), la cual tiene registros desde 1960 a la fecha actual. La estación Rubén Darío (código 69089) solamente tiene registros de 1973 a 1988 (Abt y Associates, 1995). Las estaciones pluviográficas Fuerza Aérea y San Antonio Sur solamente tienen cuatro años de registro, por lo que nos e consideraron en este estudio. Las otras cuatro estaciones (PV) registran precipitación total diaria.

2.3. Simulación Hidrológica

Se analizaron los pluviogramas de los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto de Managua para el período 2002-2016, con intervalos de 10 minutos, con duraciones menores o iguales a tres h, y alturas de precipitación menores o iguales a 20 mm. Los eventos fueron agrupados por el cuartil donde ocurrió la máxima intensidad de la lluvia. Para cada evento y cuartil se obtuvo la curva masa acumulada estandarizada con respecto a la duración total de la lluvia y la altura total de la lluvia. Se obtuvo para cada cuartil el perfil medio de la distribución temporal de la lluvia de corta duración.

Según Chow et al (1988) citando a la Organización Meteorológica Mundial OMS (1983), la altura de precipitación promedio en una cuenca disminuye cuando el tamaño de su área se incrementa, y sugiere determinar la precipitación promedio en la cuenca utilizando las curvas área-altura de precipitación. Para el caso de la microcuenca del cauce 31 de Diciembre, su área es menor que 15 Km2 y su tiempo de concentración cerca de 1.5 h, de las curvas propuestas por Chow et al (1988), el factor de reducción para la lluvia puntual es aproximadamente 0.98, por lo que casi no habría reducción en la lluvia puntual para la microcuenca en estudio. Por esta razón, la altura de precipitación en la estación Aeropuerto de Managua fue tomada como la altura de precipitación promedio en la microcuenca en estudio.

Se analizaron las intensidades máximas anuales de precipitación la estación Aeropuerto de Managua utilizando la función de distribución Gumbell, Chow et al (1988). Tomando en cuenta que la microcuenca en estudio tiene un tiempo de concentración de la lluvia menor que dos horas, solamente se calcularon las intensidades para duraciones de una, dos y tres h.

Se determinaron las alturas de precipitación total (PDF) a partir de las intensidades anteriores para los períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, y las duraciones de una, dos y tres h. Se hizo el mismo análisis para la serie de precipitaciones máximas de 24 h de duración para el período 1971-2005.

El Sistema de Simulación Hidrológica (HMS) fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC, 2000). El modelo dispone de varios métodos de transformación de la lluvia en escorrentía. Se optó por el método del Hidrograma Unitario del antiguo SCS, hoy National Resources Conservation Service (NRCS, 2007), el cual es un modelo paramétrico basado en el promedio de hidrogramas unitarios derivados de caudales y precipitaciones medidos en un gran número de pequeñas cuencas en EE.UU. (HEC, 2000). El caudal pico del hidrograma unitario del SCS está dado por la Ecuación 1:

$$U_p = \frac{0.208\ A}{T_p}$$

[Ecuación 1]

Donde:
Up = caudal pico unitario (m3/(s-mm))
A = superficie de la cuenca (Km2)
Tp = tiempo al pico (h)
El tiempo al caudal pico se calcula con la Ecuación 2:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag}$$

(2)

Donde Δt < Tc/3, es la duración de la lluvia efectiva unitaria (h), y tlag es el tiempo de desfase, es la diferencia entre el tiempo del centro de masa de la lluvia efectiva y el tiempo al pico del HU (horas).

La relación promedia de tlag y el tiempo de concentración Tc está dada por tlag = 0.6 Tc, con Tc en horas (NRCS, 2007).

El caudal pico se calcula con la Ecuación 3:

$$Q_p = P_e U_p$$

(3)

Donde:
Qp = caudal pico del hidrograma de crecida (m3/s)
Pe = lluvia en exceso o efectiva (mm)
Up = caudal pico unitario (m3/(s-mm))

Para separar la lluvia efectiva (Pe) de la lluvia total (P) se utiliza el método de los números de curva (NRCS, 1986). La escorrentía superficial se estima con la Ecuación 4:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

(4)

En la cual Pe es la escorrentía superficial acumulada o lluvia en exceso (mm), P es la precipitación total (mm), Ia es la abstracción inicial (mm), y S es la retención potencial máxima del suelo o umbral de la escorrentía (mm).

La abstracción inicial y la retención potencial se calculan con la Ecuación 5 y Ecuación 6:

$$I_a = 0.2\,S \tag{5}$$

$$S = 5.08\left(\frac{100}{CN} - 10\right) \tag{6}$$

Donde CN es el Número de Curva, que es función del grupo hidrológico del suelo, tipo de cobertura, tratamiento del suelo, condición hidrológica y de la humedad antecedente en el suelo. El CN puede ser seleccionado de las tablas del documento Hidrología urbana para pequeñas cuencas (NRCS, 1986).

Para estimar el tiempo de concentración Tc se utilizó el método propuesto por el NRCS (1986). Se define el Tc como el tiempo que le toma a la escorrentía viajar desde el punto hidráulicamente más distante de la cuenca hasta el punto de interés dentro de la cuenca.

Se define el tiempo de viaje Tt como el tiempo que le toma al agua viajar de un sitio a otro en la cuenca. El Tt es un componente del tiempo de concentración Tc. El tiempo de concentración se calcula sumando todos los tiempos de viaje de los componentes consecutivos del sistema de transporte hidráulico. El NRCS (1986) también dice que el agua se mueve a través de una cuenca como un flujo en lámina, flujo concentrado poco profundo, y flujo en canal abierto, o alguna combinación de éstos. El tipo de movimiento que ocurre es función del sistema de transporte y la mejor forma de determinarlo es por inspección de campo.

El tiempo de viaje Tt es la relación de la longitud del flujo a la velocidad del flujo, ver Ecuación 7:

$$T_t = \frac{L}{3600V} \tag{7}$$

Donde:
Tt = tiempo de viaje (h)
L = longitud el flujo (m)
V = velocidad del flujo (m/s)
El valor 3600 es el factor de conversión de segundos a horas.

El tiempo de concentración Tc es la suma de los valores de Tt de varios segmentos de flujo consecutivos, ver Ecuación 8:

$$T_c = T_{t1} + T_{t2} + \ldots T_{tm} \tag{8}$$

Donde Tc es el tiempo de concentración (h) y "m" es el número de segmentos de flujos consecutivos. El flujo en lámina es el flujo sobre una superficie plana, este usualmente ocurre en las cabeceras de las corrientes. Con el flujo en lámina el valor de la fricción (n de Manning) es un coeficiente de rugosidad efectiva que incluye el efecto del impacto de las gotas de lluvia, el arrastre sobre la superficie plana, obstáculos (tales como desechos, residuos de cosechas y rocas) y erosión y transporte de sedimentos. Estos valores de "n" son para profundidades de flujos muy pequeñas de unos 3 cm o menos. Para el flujo en lámina con una longitud menor o igual a 90 m, se utiliza la solución cinemática de Manning para calcular Tt, ver Ecuación 9:

$$T_t = \frac{0.091(n\,L)^{0.8}}{P_2^{\,0.5} S^{0.4}}$$

(9)

Donde:

Tt = tiempo de viaje (h).

L = longitud el flujo (m).

.n = coeficiente de rugosidad de Manning.

S = pendiente de la línea de gradiente hidráulico (se puede tomar la pendiente del terreno m/m).

P2 = altura de la lluvia con una duración de 24 h y un período de retorno de 2 años (mm).

El coeficiente de rugosidad de Manning "n" puede ser obtenido del documento Hidrología Urbana del NRCS (1986).

Después de una longitud máxima de 90m, el flujo en lámina se transforma a flujo concentrado de poca profundidad. La velocidad promedia para este flujo puede ser determinada del NRCS (1986), en el cual la velocidad promedio es función de la pendiente del curso de agua y el tipo de canal. Una vez determinada la velocidad promedio, con la Ecuación 7 se determina el tiempo de viaje para el segmento del flujo concentrado poco profundo.

Se asume que el flujo en canales abiertos ocurre en aquellos lugares donde los canales son visibles en fotografías aéreas (o imágenes satelitales) y se dispone de información topográfica de mediciones de las secciones transversales. Se puede utilizar la ecuación de Manning o información del perfil de la superficie del agua para estimar la velocidad promedio del flujo. Esta última se determina usualmente para la sección transversal llena (elevación de la banqueta). La Ecuación 10 de Manning es:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{0.5}$$

(10)

Donde:
V = velocidad media del flujo (m/s).
R = radio hidráulico (m).
S = pendiente de la línea de gradiente hidráulico (pendiente del canal, m/m).
.n = coeficiente de rugosidad de Manning para flujo abierto en canales.

El coeficiente de rugosidad de Manning para flujo en canales abiertos puede ser obtenido de libros de textos como el de Chow (1994). Después de obtener la velocidad promedio con la Ecuación 10, el tiempo de viaje para el segmento del flujo se obtiene con la Ecuación 7.

Resultados:

3.1. Análisis de datos de precipitación

El resultado del análisis de las intensidades máximas anuales de precipitación la estación Aeropuerto de Managua utilizando la función de distribución Gumbell se muestran en la Tabla 3

TABLA 3
IDF para la estación Aeropuerto de Managua (mm/h)

Duración	Período de Retorno T (años)			
(min)	10	25	50	100
60	74	88	99	109
120	50	61	69	77
180	35.7	43	49	55

Nota INTER CONSULT (2002)

Se determinaron las alturas de precipitación total (PDF) a partir de las intensidades de la Tabla 3 para los períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, y las duraciones de una, dos y tres h, ver Tabla 4

TABLA 4
PDF para la estación Aeropuerto de Managua (mm)

Duración	Período de Retorno T (años)			
(min)	10	25	50	100
60	74	88	99	109
120	100	122	138	154

Se hizo el mismo análisis para la serie de precipitaciones máximas de 24 h de duración, para el período 1971-2005, cuyos valores se muestran en la Tabla 5.

TABLA 5
PDF de 24 h para la estación Aeropuerto de Managua, período 1971-2005 (mm)

T (años)	2	5	10	20	25	50	100

El resultado del análisis de los pluviogramas de los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto de Managua para el período 2002-2016, con intervalos de 10 minutos, con duraciones menores o iguales a tres h, y alturas de precipitación mayores o iguales a 20 mm se muestran en la Tabla 6. Esta tabla contiene para cada cuartil el perfil medio de la distribución temporal de la lluvia de corta duración.

TABLA 6
Perfil de distribución temporal de la lluvia, duración ≤ 3 h, t ≥ 20 mm

Porcentaje acumulativo de la duración de la lluvia	Porcentaje acumulativo de la altura de la lluvia			
	Q-I	Q-II	Q-III	Q-IV
0	0	0	0	0
5	4.6	2.0	1.3	1.2
10	14.6	6.1	4.1	3.2
15	26.1	10.8	7.4	5.7
20	37.1	16.2	10.8	8.3
25	46.6	22.6	14.5	11.0
30	54.3	30.3	18.5	14.5
35	61.4	38.8	23.0	18.3
40	67.4	47.8	27.9	22.3
45	72.7	56.9	33.8	26.4
50	77.4	65.8	41.7	30.9
55	80.7	72.6	51.0	35.9
60	83.7	78.5	59.9	42.4
65	86.9	83.4	67.6	49.5
70	89.7	87.4	74.4	57.0
75	92.3	90.8	80.9	65.0
80	94.2	93.7	86.9	73.5
85	96.0	95.8	92.1	84.4
90	97.6	97.3	96.1	91.7
95	98.8	98.7	99.0	97.4
100	100.0	100.0	100.0	100.0

Nota. Q: cuartil Blanco Chávez (2021)

Las probabilidades de ocurrencia para los eventos son mayores para los cuartiles primero y segundo (82% juntos), 16% para el tercer cuartil y sólo 2% para el cuarto cuartil. El primer cuartil tiene las lluvias con mayores intensidades y el segundo cuartil con las mayores alturas totales. A partir de la Tabla 6 se obtuvieron las curvas del perfil de distribución de la lluvia, como se muestra en la Figura 7.

Debido a que la estación Aeropuerto de Managua está cerca del área de estudio y tiene registros en el período 2002-2016, las curvas del perfil de distribución de la lluvia (Tabla 6 y Figura 7) fueron utilizadas en el análisis hidrológico de la microcuenca del estudio.

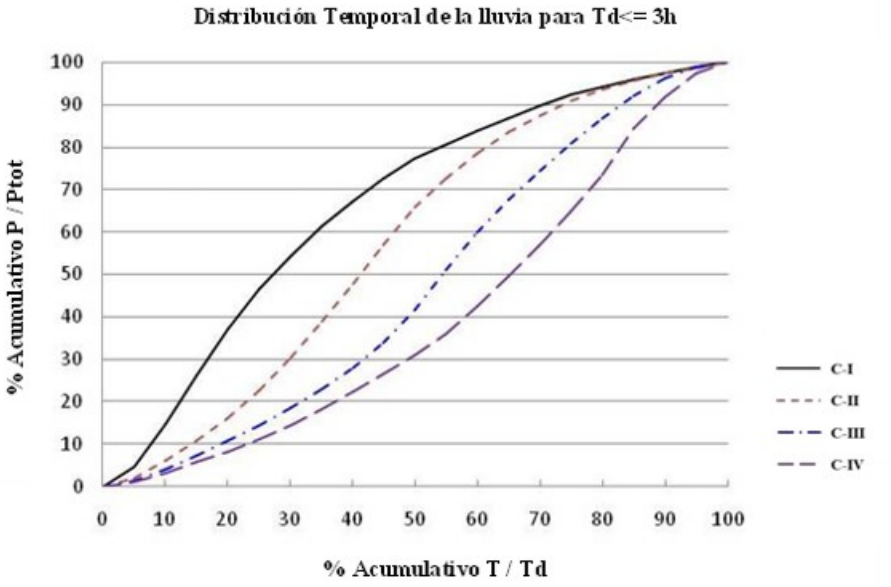

FIGURA 7
Perfil de distribución temporal de la lluvia, estación Aeropuerto de Managua.

Simulación Hidrológica

La simulación hidrológica de la microcuenca del cauce 31 de Diciembre utilizando el Modelo HMS, con el método del Hidrograma Unitario y el método del Número de Curvas se realizó hasta el punto de cierre definido en la intersección del cauce 31 de Diciembre con la carretera norte de la Ciudad de Managua. La microcuenca fue dividida en cinco pequeñas aéreas para tomar en cuenta el efecto de cada segmento del cauce en la respuesta de toda la microcuenca.

La Figura 8 muestra cada pequeña área y sus puntos de salida U1, U2 y U3 y U4, y la Tabla 7 muestra sus características físicas. La simulación fue realizada para dos escenarios: uso del suelo en el año 2018 y proyección del uso del suelo al año 2040.

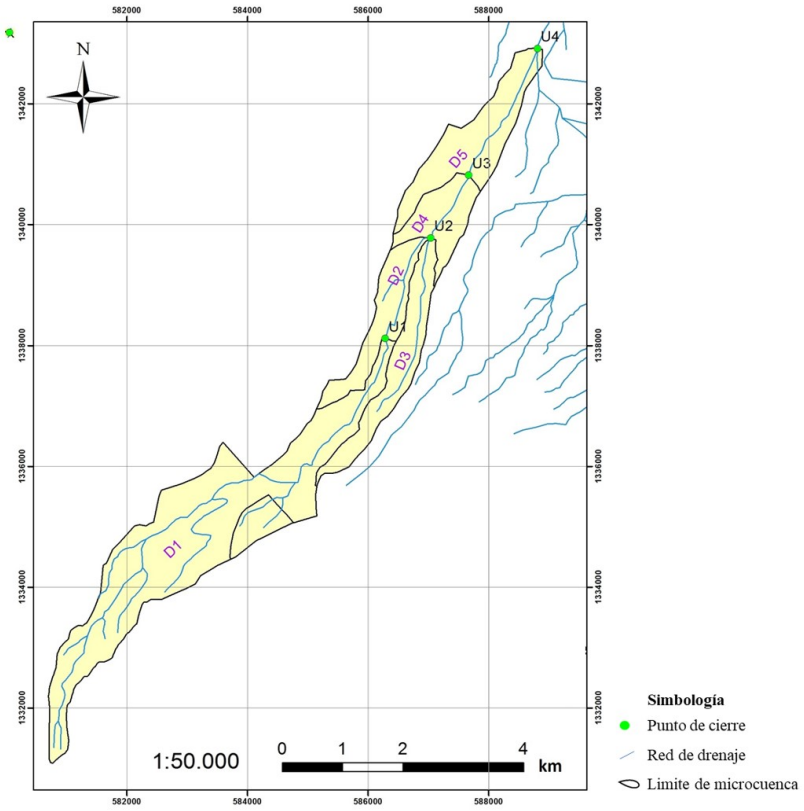

FIGURA 8
Puntos de salida en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre.

TABLA 7
Características físicas principales de la microcuenca 31 de Diciembre.

Parámetro	Unidad	D1	D2	D3	D4	D5
Longitud Base	(m)	9 900	3 400	4 750	1 236	3 900
Longitud del Canal	(m)	9 360	3 200	3 150	1 750	3 500
H max	(m)	545	209	198	134	122
H min	(m)	166	120	120	92	55
ΔH	(m)	379	89	78	42	67
S	(m/m)	0.040	0.028	0.025	0.024	0.019

Tomando en cuenta la textura del suelo (ver Figura 3), la pendiente del suelo y el uso del suelo al año 2018 (ver Figura 4) se asignó el parámetro Número de Curva CN a cada pequeña área y se estimó el valor ponderado de CN. La Tabla 8 muestra los valores obtenidos, donde podemos observar que las aéreas con mayor % de urbanización tienen el mayor valor de CN ponderado.

TABLA 8
CN para la microcuenca 31 de Diciembre, año 2018.

Microcuenca	Área	A%		CN		
	(km2)	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Ponderado
D1	6.91	45	55	85	58	70.3
D2	1.27	74	26	85	64	79.6
D3	1.55	35	65	85	64	71.3
D4	1.08	89	11	85	68	83.1
D5	2.01	76	24	85	68	80.9

Utilizando las ecuaciones de la 7 a la 10, para un valor de precipitación máxima de 24 h, P2 = 85 mm tomado de la Tabla 5, datos de inspección de campo, los mapas de uso del suelo 2018 y topográfico, se calculó el tiempo de concentración para cada pequeña área de la microcuenca, ver Tabla 9. El flujo en el canal fue dividido en varios segmentos para representar el efecto de las diferentes pendientes. El Tlag se calculó como 0.6 Tc.

TABLA 9
Tc y tlag para la microcuenca 31 de Diciembre, uso del suelo del año 2018

Microcuenca	D1	D2	D3	D4	D5
Tc (h)	1.27	0.49	0.68	0.28	0.35
tlag = 0.6 Tc	0.77	0.29	0.41	0.17	0.21

La simulación hidrológica de la microcuenca con el modelo HMS se realizó utilizando los datos de las Tablas 8 y 9, los perfiles temporales de la lluvia de los cuartiles 1 y 2 de la estación Aeropuerto de Managua (Tabla 6), las alturas de lluvia para duraciones de una, dos y tres horas y períodos de retorno de 25, 50 y 100 años (Tabla 4). Los resultados de la simulación se muestran en las Tablas 10, 11, 12 y 13.

TABLA 10
Q máx. en la salida U1 (m3/s), uso del suelo año 2018

Cuartil	T	Duración de la lluvia (h)		
	(año)	1	2	3
Q 1	25	38.6	55.6	41.9
	50	49.3	69.4	53.2
	100	59.5	84.1	65.4
Q 2	25	40.3	61.8	50.7
	50	51.4	76.8	63.6
	100	62.1	92.4	77.1

TABLA 11
Q máx. en la salida U2 (m3/s), uso del suelo año 2018

Cuartil	T (año)	Duración de la lluvia (h)		
		1	2	3
Q 1	25	51.6	77.3	60.1
	50	65.4	96	75.8
	100	78.6	115.4	92.5
Q 2	25	53.1	84.6	72.3
	50	67.3	104.8	90.1

TABLA 12
Q máx. en la salida U3 (m3/s), uso del suelo año 2018

Cuartil	T (año)	Duración de la lluvia (h)		
		1	2	3
Q 1	25	56	84.4	67.2
	50	70.3	104.5	84.4
	100	84.1	125.4	102.4
Q 2	25	58	91.4	80.3
	50	72.5	112.9	99.7

TABLA 13
Q máx. en la salida U4 (m3/s), uso del suelo año 2018.

Cuartil	T (año)	Duración de la lluvia (h)		
		1	2	3
Q 1	25	71	97.9	79.8
	50	87.5	120.5	99.5
	100	102.9	143.9	120.2
Q 2	25	77	105.9	94.8
	50	94.1	129.9	117.1
	100	110.4	154.7	140.2

Los resultados para el perfil de la lluvia de los cuartiles uno y dos nos muestran que el caudal máximo ocurre para una duración de la lluvia de dos h, en los cuatro puntos de salida. Para la microcuenca del cauce 31 de Diciembre, que tiene aproximadamente un tiempo de concentración de 1.5 h, la duración de la lluvia que nos produce el caudal máximo es de dos horas. Si comparamos los caudales máximos del cuartil uno y el cuartil dos, para una duración de la lluvia de dos h, el caudal más alto ocurre con el cuartil dos. La simulación nos dice que el perfil de la lluvia del cuartil dos y la duración de la lluvia de dos horas producen el máximo caudal en la microcuenca.

Los máximos caudales simulados para el uso del suelo del año 2018 para la microcuenca del cauce 31 de Diciembre se muestran en la Tabla 14, para el perfil de la lluvia del cuartil dos y duración de la lluvia de dos h.

TABLA 14
Q máx. en la microcuenca 31 de Diciembre (m3/s), uso del suelo año 2018

Salida	T (años)			
	10	25	50	100
U1	42.3	61.8	76.8	92.4
U2	58.4	84.6	104.8	125.8
U3	63.5	91.4	112.9	135.3
U4	74.9	105.9	129.9	154.7

Se realizó la simulación hidrológica para la proyección del uso del suelo al año 2040 (ver Figura 5), con duración de la lluvia de dos horas, la distribución temporal de la lluvia del cuartil dos (Tabla 6), y alturas de lluvia con períodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Cuando examinamos la Fig. 5, se puede ver que las aéreas de vegetación se han reducido significativamente debido al posible futuro avance de las ares urbanas. Los números de curvas fueron asignados para estas nuevas condiciones para cada pequeña área y se calculó su CN promedio, ver Tabla 15.

TABLA 15
CN para la microcuenca 31 de Diciembre, año 2040

Micro-cuenca	Area	A%		CN		
	(km2)	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Promedio
D1	6.91	70	30	85	56	76.2
D2	1.27	89	11	85	64	82.8
D3	1.55	59	41	85	65	76.9
D4	1.08	100	0	85	0	85.0
D5	2.01	100	0	85	0	85.0

Utilizando las ecuaciones de la 7 a la 10, para un valor de precipitación máxima de 24 h, P2 = 85 mm tomado de la Tabla 5, datos de inspección de campo, los mapas de proyección de uso del suelo 2040 y topográfico, se calculó el tiempo de concentración para cada pequeña área de la microcuenca, ver Tabla 16. El flujo en el canal fue dividido en varios segmentos para representar el efecto de las diferentes pendientes. El Tlag se calculó como 0.6 Tc.

TABLA 16
Tc y tlag para la microcuenca 31 de Diciembre, proyección de uso del suelo del año 2040

Microcuenca	D1	D2	D3	D4	D5
Tc	1,07	0,49	0,43	0,28	0,35
tlag = 0.6					
Tc	0,65	0,29	0,26	0,17	0,21

La simulación hidrológica de la microcuenca con el modelo HMS se realizó utilizando los datos de las Tablas 15 y16, el perfil temporal de la lluvia del cuartil dos de la estación Aeropuerto de Managua (Tabla 6), las alturas de lluvia para duraciones de una, dos y tres horas y períodos de retorno de 25, 50 y 100 años (Tabla 4). Los resultados de la simulación se muestran en la Tabla 17.

TABLA 17
Q máx. en la microcuenca 31 de Diciembre (m3/s), proyección del uso del suelo año 2040

Salida	T (años)			
	10	25	50	100
U1	59.4	83.1	101	119.3
U2	81.2	112.4	136	160.1
U3	88.3	122	147.5	173.5
U4	102.6	140.6	169.4	198.8

Si comparamos los caudales picos simulados para los escenarios de uso de suelo en los años 2018 (Tabla 14) y 2040 (Tabla 17), habría un incremento significativo en ellos. La Tabla 18 muestra el porcentaje de incremento de los caudales picos que habría para los puntos de salida en cada microcuenca para diferentes períodos de retorno.

TABLA 18
Incremento máximo de caudales ΔQ máx. (%)

Salida	T (años)			
	10	25	50	100
U1	40.4	34.,5	31.5	29.1
U2	39.0	32.9	29.8	27.3
U3	39.1	33.5	30.6	28.2
U4	37.0	32.8	30.4	28.5

Para el punto de salida U3 donde el área residencial del 31 de Diciembre está localizada, los caudales podrían incrementarse 28% para un T = 100 años, y 30% para un T = 50 años. Estos posibles incrementos para los caudales futuros al año 2040, podría suponer una fuerte presión sobre las estructuras hidráulicas y viales en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre, el cual ya ha tenido eventos que inundaron el área urbana cercana.

La Figura 9 muestra el hidrograma simulado en el punto de salida U1 para T = 100 años y una duración de la lluvia de dos h, donde podemos ver que el caudal pico y la forma del hidrograma podrían cambiar con el cambio proyectado en el uso del suelo para la microcuenca del cauce 31de Diciembre. Sin embargo, se supone que toda la cuenca del cauce 31 de Diciembre experimentará un cambio en el porcentaje de área construida del 55% al 74%, esto es un incremento cerca de 19%, este cambio no es uniforme en toda el área de la microcuenca, algunas zonas experimentarán un mayor porcentaje de cambio en uso urbano.

En el año 2018 las aéreas que tienen el más bajo % de área construida son D1 y D3, y experimentarán el mayor cambio de zona rural a urbana, cerca de 24% y 25% respectivamente. El área D1 en la zona alta de la microcuenca es la única que tributa al punto de salida D1. Este fuerte cambio en el uso del suelo se manifestaría con un mayor caudal pico de escorrentía y un menor tiempo al pico del hidrograma de crecida, como se puede ver en la Figura 9a. Un comportamiento similar tendría las otras zonas. En el punto de cierre de toda la microcuenca (U4) el caudal pico para el año 2040 se presenta en el tiempo una hora con 42 minutos (Q = 199 m3/s), y para el año 2018 se presenta en el tiempo una hora con 48 minutos (Q = 155 m3/s), con un desfase de 6 minutos.

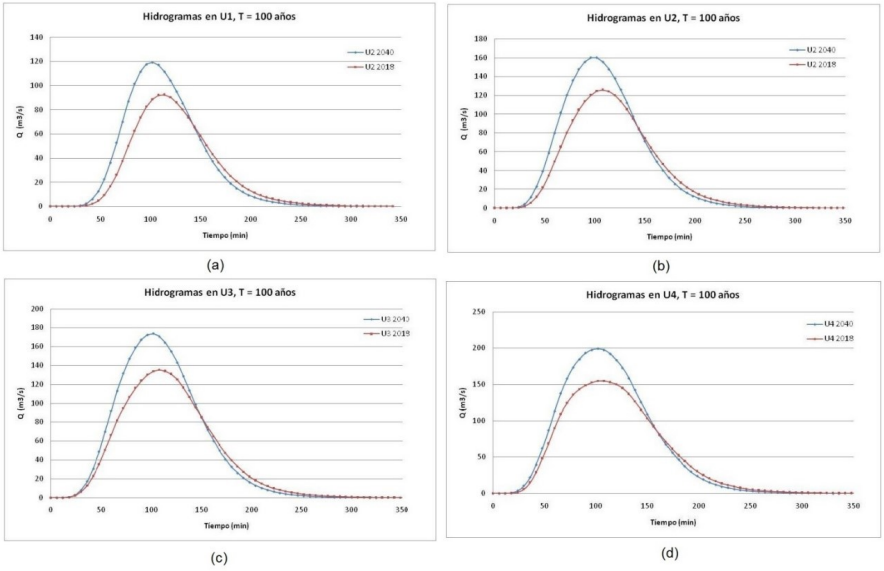

FIGURA 9
Hidrograma simulado en los puntos de cierre U1, U2, U3 y U4, T = 100 años

En la Tabla 19 se puede ver que podría haber un incremento del 8.6 a 9.5% de la precipitación efectiva en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre, estos incrementos de volúmenes explican el cambio el hidrograma de la Figura 9.

TABLA 19
Incremento de la Precipitación Efectiva ΔP (%) en U4

T (Años)	P total (mm)	P efectiva (mm) al año		ΔP (mm)	ΔP%
		2018	2040		
10	100	39.4	48.9	9.5	9.5
25	122	55.9	67.1	11.2	9.2
50	138	68.6	80.9	12.3	8.9
100	154	81.8	95.1	13.2	8.6

Conclusiones:

Los resultados presentados de la simulación hidrológica nos indican que con la proyección del cambio de aéreas rurales a urbanizadas al año 2040 en la microcuenca del cauce 31 de Diciembre se tendría como efecto un incremento significativo en la precipitación efectiva, alrededor del 9%, lo que implicaría una disminución en la capacidad de infiltración del suelo.

Para períodos de retorno de 100 años los caudales de crecidas se incrementarían en cerca del 28% y para períodos de retorno de 10 años los caudales de crecidas se incrementarían en cerca del 38%, con una disminución de los tiempos al caudal pico.

Los cambios proyectados del uso del suelo, el aumento de la población urbana, su expansión hacia el sur en la subcuenca de Managua, y las precipitaciones atípicas futuras como producto del cambio climático, contribuirían a un posible incremento de las zonas de inundación con daños a la infraestructura urbana en las zonas bajas de la microcuenca.

Recomendaciones:

Se plantea la necesidad de ampliar los estudios hidrológicos en otras microcuencas de la subcuenca sur del lago de Managua.

Se plantea la necesidad de análisis de riesgo por inundaciones a nivel micro local de las poblaciones cercanas al sitio de estudio, tomando en cuenta el futuro incremento de los caudales de crecidas en la subcuenca sur del lago de Managua.

Referencias

Abt y Associates Inc. (1995). Estudio de Factibilidad del Programa de Manejo de la Cuenca del Lago de Managua. Author.

Alcaldía de Managua (ALMA) y Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). (2017). Proyecto del Plan Maestro para el Desarrollo Urbano del Municipio de Managua, en la República de Nicaragua. Informe Final. Author.

Blanco Chávez, M. E. (2021). Patrón de distribución temporal de la lluvia en la estación Aeropuerto de Managua, período 2002-2016. Nexo Revista Científica, Vol. 36, No. 06. https://doi.org/10.5377/nexo.v34i06.13120

Referencias

Chow, V.T., Maidment, D. & Mays, L. (1988). Applied Hydrology. McGraw Hill.

Chow, V.T. (1994) Open Channel Hydraulics. McGraw Hill.

Congedo Luca. (2020). Semi Automatic Classification Plugging Documentation. V6.4.02. http://qgis.osgeo.org

Hydrologic Engineering Center HEC. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. Army Corps of Engineers.

INTER-CONSULT. (2002). Estudio Agroecológico y de Drenaje Pluvial de la Subcuenca III de la Cuenca Sur del Lago de Managua. Informe Hidrológico Base. Author.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (2004). Atlas Climático de Nicaragua. Author.

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1971). Volumen I. Levantamiento de Suelos de la Región Pacifica de Nicaragua. Parte 2. Descripción de Suelos. Catastro e Inventario de los Recursos Naturales de Nicaragua. Author.

Natural Resources Conservation Services, NRCS. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55 (TR 55). Author

Natural Resources Conservation Services, NRCS. (2007). Part 630 Hydrology. National Engineering Hand Book NEH. Author.

QGIS Development Team. (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. http://qgis.osgeo.org

United States Geological Survey USGS. (2018). Land Sat 8, USA: EROS, USGS. https://landsat.usgs.gov/landsat-collections.

World Meteorological Organization WMO. (4th ed., 1983). Guide to Hydrological Practice. Vol. II. Analysis, forecasting and other applications. WMO no. 168, 4th ed. Geneva, Switzerland. Author.