



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v10i18.0911>

MANEJO HÍDRICO SOSTENIBLE MEDIANTE ATENUADORES DE ESCORRENTÍA PARA LA MITIGACIÓN DE INUNDACIONES EN LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA SAN SEBASTIÁN, CANTÓN GUANO

SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT THROUGH RUNOFF ATTENUATION MEASURES FOR FLOOD MITIGATION IN THE SAN SEBASTIÁN RAVINE MICRO-WATERSHED, GUANO CANTON

Sánchez-Vaca Luis Anibal ¹; Castro-Solórzano Fidel Alberto ²

¹ Maestría Hidráulica Con Mención en Obras Hidráulicas, Universidad Técnica de Ambato. Ecuador. Correo: lsanchez8507@uta.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4865-5374>

² Maestría Hidráulica Con Mención en Obras Hidráulicas, Universidad Técnica de Ambato. Ecuador. Correo: fidelcastro@uta.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3858-9239>

Resumen

El presente estudio evaluó el manejo hídrico sostenible mediante atenuadores de escorrentía para la mitigación de inundaciones en la microcuenca de la quebrada San Sebastián, cantón Guano, Ecuador. La investigación integró análisis morfométrico, validación estadística de precipitaciones, modelación hidrológica mediante HEC-HMS, simulación hidráulica en HEC-RAS y priorización espacial de medidas de bioingeniería mediante la Guía Metodológica HIRO. Se emplearon registros de precipitación máxima en 24 horas de la estación FRN-ESPOCH para el periodo 2000–2021, procesados en Hydrognomon mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov y ajuste de distribuciones probabilísticas para determinar precipitaciones de diseño asociadas a periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años. Estas precipitaciones fueron incorporadas en HEC-HMS junto con parámetros morfométricos y el método SCS-CN para estimar la respuesta lluvia-escorrentía de la microcuenca. Los resultados mostraron caudales máximos actuales de 5,00; 6,90; 9,60 y 17,70 m³/s para periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años, respectivamente. La simulación hidráulica desarrollada en HEC-RAS para el escenario de 500 años registró una profundidad máxima de 23,21 m y una velocidad máxima de 25,30 m/s, identificando sectores con elevada energía hidráulica, potencial erosivo y susceptibilidad a procesos de degradación del suelo. La aplicación de la metodología HIRO permitió priorizar áreas aptas para reforestación, zanjas de infiltración, barreras vivas y control de cárcavas. Bajo el escenario intervenido con reforestación, los caudales disminuyeron a 2,70; 4,10; 5,70 y 10,60 m³/s, con reducciones entre 40,11 % y 46,00 %. Se concluye que la integración de herramientas hidrológicas, hidráulicas y geoespaciales permite identificar zonas críticas y diseñar estrategias efectivas de manejo hídrico sostenible, donde las soluciones basadas en la naturaleza contribuyen significativamente a reducir la escorrentía superficial, la energía del flujo y el riesgo de inundaciones en microcuencas andinas.

Palabras claves: Atenuadores de escorrentía; HEC-HMS; Hydrognomon; inundaciones; microcuenca San Sebastián; Número de Curva.

Abstract

This study evaluated sustainable water management through runoff attenuation measures for flood mitigation in the San Sebastián Ravine micro-watershed, Guano Canton, Ecuador. The research integrated morphometric analysis, statistical rainfall validation, hydrological modeling using HEC-HMS, hydraulic simulation with HEC-RAS, and spatial prioritization of bioengineering measures through the HIRO methodological framework. Maximum 24-hour rainfall records from the FRN-ESPOCH station for the 2000–2021 period were processed in Hydrognomon using the Kolmogorov-Smirnov test and probability distribution fitting to estimate design rainfall for 25-, 50-, 100-, and 500-year return periods. These rainfall values were incorporated into HEC-HMS

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 13 de febrero de 2026.

Fecha de aceptación: 15 de abril de 2026.

Fecha de publicación: 22 de junio de 2026.



together with morphometric parameters and the SCS-CN method to simulate rainfall-runoff response. Results showed peak discharges of 5.00, 6.90, 9.60, and 17.70 m³/s for return periods of 25, 50, 100, and 500 years, respectively. The hydraulic simulation conducted in HEC-RAS for the 500-year event reported a maximum flow depth of 23.21 m and a maximum velocity of 25.30 m/s, identifying sectors with high hydraulic energy, erosion potential, and susceptibility to soil degradation processes. The application of the HIRO framework enabled the prioritization of suitable areas for reforestation, infiltration trenches, live barriers, and gully control measures. Under the reforestation scenario, peak discharges decreased to 2.70, 4.10, 5.70, and 10.60 m³/s, representing reductions between 40.11% and 46.00%. It is concluded that the integration of hydrological, hydraulic, and geospatial tools provides an effective approach for identifying critical areas and designing sustainable watershed management strategies, where nature-based solutions significantly reduce surface runoff, flow energy, and flood risk in Andean micro-watersheds.

Keywords: Runoff attenuation; HEC-HMS; Hydrognomon; floods; San Sebastián micro-watershed; Curve Number.

1. Introducción

Las inundaciones asociadas a eventos de precipitación extrema constituyen una de las amenazas hidrometeorológicas más relevantes para los territorios urbanos y periurbanos, especialmente cuando las dinámicas naturales de infiltración, almacenamiento y conducción del agua han sido alteradas por la expansión urbana, la pérdida de cobertura vegetal y el uso inadecuado del suelo Lalonde et al. (2024). En este contexto, el manejo sostenible de cuencas y microcuencas se ha convertido en una estrategia fundamental para reducir la vulnerabilidad territorial, ya que permite abordar el riesgo desde la parte alta y media del sistema hídrico, antes de que la escorrentía se concentre en zonas urbanas

expuestas Zoghi et al. (2025). Desde esta perspectiva, las soluciones basadas en la naturaleza, la bioingeniería y los atenuadores de escorrentía adquieren relevancia porque contribuyen a disminuir el caudal pico, favorecer la infiltración y reducir la velocidad del flujo superficial durante eventos de lluvia intensa (Giler-Ormaza et al., 2020; Castillo Lescano, 2023)

Los atenuadores de escorrentía representan una alternativa técnica y ambientalmente viable para la mitigación de inundaciones, debido a que integran medidas como reforestación, forestación, terrazas, zanjas de infiltración, control de cárcavas, conservación de suelos y restauración de coberturas vegetales Herath et al. (2025). Estas intervenciones permiten modificar la respuesta hidrológica de las



microcuencas, al incrementar la rugosidad superficial, reducir la erosión, mejorar la capacidad de retención hídrica y disminuir la generación de escorrentía directa. Estudios recientes desarrollados en Ecuador han demostrado que la identificación de sitios óptimos para estos atenuadores puede apoyarse en Sistemas de Información Geográfica, análisis de pendiente, cobertura vegetal, litología, permeabilidad, pluviosidad y modelación hidrológica mediante HEC-HMS, lo que aporta una base metodológica sólida para el diseño de estrategias de manejo hídrico sostenible (Castro Solórzano, 2023; Morales Gutama et al., 2024).

En la provincia de Chimborazo, el cantón Guano presenta condiciones geomorfológicas e hidrológicas que incrementan su exposición frente a inundaciones y aluviones, particularmente en zonas urbanas aledañas a quebradas naturales. La quebrada San Sebastián constituye un sistema hídrico estratégico, debido a que su escorrentía superficial se desplaza desde áreas altas del cerro Igualata hacia sectores poblados del cantón. La caracterización previa de esta

microcuenca evidencia que posee un área de 9,292 km², un perímetro de 23,737 km, una longitud de 8,176 km y una forma alargada, condiciones que influyen directamente en su comportamiento hidrológico y en la concentración progresiva de caudales hacia las zonas bajas (Uquillas Saltos, 2023).

La problemática se vuelve más crítica al considerar que la microcuenca San Sebastián presenta cambios de cobertura y uso del suelo, con presencia de páramo, mosaico agropecuario, vegetación arbustiva, plantaciones forestales y áreas pobladas. Estas condiciones modifican la relación entre precipitación, infiltración y escorrentía, especialmente en sectores donde la expansión urbana, el pastoreo, los cultivos y la ocupación de franjas cercanas al cauce reducen la capacidad natural del territorio para amortiguar eventos de lluvia. En este sentido, la caracterización biofísica de la microcuenca permite comprender no solo sus rasgos físicos, sino también las presiones antrópicas que inciden en la generación de escorrentía superficial y en la necesidad de implementar medidas preventivas de



manejo hídrico (Uquillas Saltos, 2023).

Los antecedentes locales muestran que las inundaciones en Guano no corresponden a eventos aislados, sino a una problemática recurrente asociada a lluvias intensas, desbordamientos de quebradas y limitada planificación del drenaje natural. La investigación sobre los efectos del cambio climático en las quebradas San Sebastián y El Rosario identificó incrementos relevantes en la respuesta hidrológica bajo escenarios futuros; específicamente, para la quebrada San Sebastián se estimó un aumento del caudal máximo de 4,24 m³/s en condiciones actuales a 6,14 m³/s bajo escenario de cambio climático, lo que evidencia un incremento de la amenaza sobre zonas urbanas vulnerables (Lema Osorio & Suárez Venlasaga, 2023).

A pesar de estos avances, persiste un vacío técnico en la integración de la caracterización morfométrica, el análisis biofísico y la propuesta específica de atenuadores de escorrentía para la microcuenca San Sebastián. Los estudios previos han aportado información relevante sobre la delimitación, morfometría,

modelación hidrológica y zonas propensas a inundación; sin embargo, aún se requiere una propuesta orientada a la intervención sostenible del territorio, capaz de identificar áreas críticas para implementar medidas de retención, infiltración, restauración vegetal y control de erosión. Esta brecha justifica el desarrollo de una investigación aplicada que no solo describa el problema, sino que proponga alternativas de mitigación basadas en evidencia hidrológica, ambiental y territorial (Castro Solórzano, 2023; Castillo Lescano, 2023; Morales Gutama et al., 2024).

En este contexto, La presente investigación tiene como objetivo evaluar el manejo hídrico sostenible mediante atenuadores de escorrentía para la mitigación de inundaciones en la microcuenca de la quebrada San Sebastián, cantón Guano, a partir de la caracterización morfométrica, biofísica e hidrológica del área de estudio, con el fin de identificar zonas críticas de generación de escorrentía y proponer medidas de intervención basadas en reforestación, conservación de suelos, control de

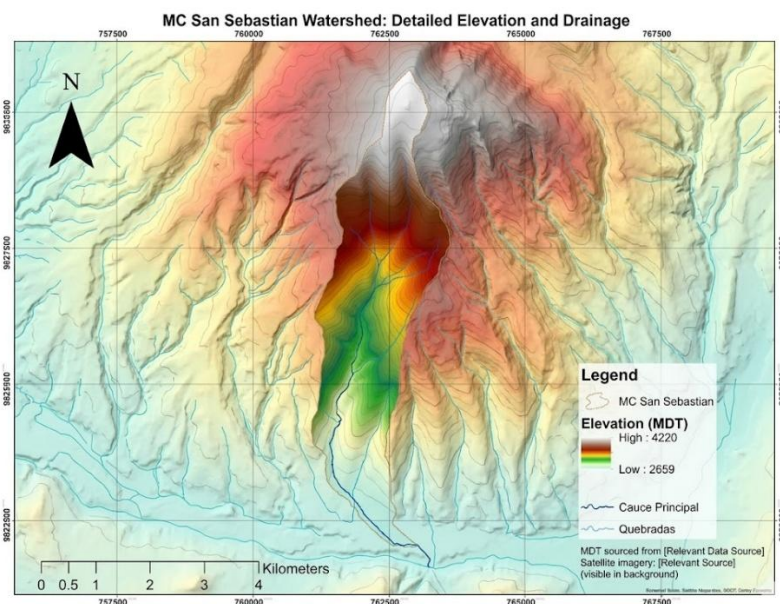
cárcavas y estructuras naturales de retención hídrica.

2. Metodología

El área de estudio correspondió a la microcuenca de la quebrada San Sebastián, localizada en el cantón Guano, provincia de Chimborazo, Ecuador. Esta unidad hidrográfica se extiende sobre el cerro Igualata y comprende sectores de las parroquias Guano y San Isidro, constituyéndose en un sistema

natural de drenaje con influencia directa sobre zonas urbanas expuestas a inundaciones y aluviones. De acuerdo con la caracterización de Uquillas Saltos (2023), la microcuenca tiene un área de 9,292 km², un perímetro de 23,737 km, una longitud de 8,176 km y un ancho de 1,137 km, lo cual evidencia una configuración alargada que condiciona la concentración progresiva del flujo hacia la parte baja del sistema.

Fig. 1. Mapa de ubicación, modelo digital de terreno (MDT) y red de drenaje de la microcuenca de la quebrada San Sebastián (cantón Guano, Chimborazo). El mapa detalla el gradiente altitudinal 2659 a 4220 m s. n. m sobre el cerro Igualata, delimitando el cauce principal y las quebradas proyectadas en sistema UTM (m).



El presente estudio se desarrolló mediante un marco metodológico integral que combina el levantamiento de información de

campo, el análisis hidrológico probabilístico y la modelación hidráulica, con el fin de caracterizar el régimen de flujo e identificar las



zonas susceptibles a la erosión que producen procesos de socavación en el tramo de estudio. Este enfoque integrado ha demostrado ser altamente efectivo para la evaluación de sistemas fluviales complejos, particularmente en ríos aluviales de alta energía (Schuurman et al., 2016; Eke et al., 2020).

Condiciones Climatológicas

Las condiciones climatológicas constituyen elementos propios del clima que caracterizan una zona determinada durante un periodo

específico. Estas pueden variar según la ubicación geográfica, la estación del año y otros factores ambientales que influyen en el comportamiento climático de un territorio (Reyes, 2023). En este sentido, la presente investigación en la (Tabla 1) se considera el análisis de las precipitaciones máximas registradas en un periodo de 24 horas, a partir de los datos obtenidos de la Estación Agrometeorológica FRN ESPOCH, correspondientes al periodo comprendido entre los años 2000 y 2021.

Tabla 1. Precipitación máxima en 24 horas registrada en la estación FRN-ESPOCH, periodo 2000–2021.

Año	Máxima Precipitación 24 h (mm)
2000	52,70
2001	44,80
2002	33,80
2003	32,00
2004	42,70
2005	27,90
2006	26,40
2007	33,30
2008	24,80
2009	13,90
2010	24,20
2011	29,60
2012	16,90
2013	59,60
2014	29,50
2015	23,30
2016	41,00
2017	49,30



2018	22,20
2019	28,50
2020	32,30
2021	25,60

Delimitación de la microcuenca y preparación de HEC-HMS

La delimitación se efectuó directamente en HEC-HMS 4.13, integrando los Shapefiles de límites y la red hídrica. El procedimiento incluye:

1. Creación de elementos Subbasin, Reach y Sink y sus conexiones topológicas.
2. Asignación de parámetros e entrada: área de la cuenca, longitud del cauce, pendiente media, Número de Curva (NC) ponderado, tiempo de concentración (Tc) y tiempo de retardo (Tr).

3. Integración de hietogramas de diseño, derivados de curvas IDF y registros históricos, para cada evento de precipitación.

Parámetros morfométricos

Se calcularán parámetros de forma, relieve y drenaje mediante HEC-HMS y SIG:

- Forma: área, perímetro, longitud, ancho, factor de forma, coeficiente de Gravelius, relación de elongación e índice de alargamiento.
- Relieve: pendiente media de la cuenca, pendiente del cauce principal y curva hipsométrica.
- Drenaje: densidad de drenaje, orden de corriente, relación de bifurcación, Tc y Tr.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos simulados

Parámetro	Símbolo	Unidad	Método
Área	A	km ²	ArcGIS / HEC-HMS
Perímetro	P	km	ArcGIS / HEC-HMS
Longitud	L	km	ArcGIS / HEC-HMS
Pendiente media	S	%	DEM
Tiempo de concentración	Tc	h	Fórmula de Kirpich
Tiempo de retardo	Tr	h	HEC-HMS
Número de Curva	CN	-	Método SCS-CN

Calibración y validación de datos

Para garantizar la precisión de los parámetros hidrológicos y la confiabilidad de los hidrogramas, los valores calculados, validaron y calibrados mediante Hydrognomon. Esto permitirá:

- Ajustar los tiempos de concentración y retardo según registros históricos.
- Determinar la distribución de caudales máximos por tiempos de retorno.
- Corroborar que el Número de Curva ponderado y la respuesta lluvia-escorrentía del modelo HEC-HMS reflejen adecuadamente la hidrología real de la microcuenca (Duque-Sarango & Patiño, 2019; Lema Osorio & Suárez Venlasaga, 2023).

Cálculo del Número de Curva y factor de escorrentía

El Número de Curva se estimó mediante el método SCS-CN, considerando la relación entre el uso del suelo, la cobertura vegetal, el grupo hidrológico y la condición antecedente de humedad Sciuto et al. (2025). Este método permite

estimar el exceso de precipitación a partir de la capacidad de retención del suelo y es ampliamente utilizado en HEC-HMS para representar pérdidas por infiltración y generación de escorrentía directa Kourtis et al. (2025)

El Número de Curva ponderado se calculó mediante la siguiente expresión:

$$CN = \frac{\sum(A_i \cdot CN_i)}{A}$$

donde CN_p corresponde al Número de Curva ponderado de la microcuenca, A_i representa el área de cada unidad de cobertura o grupo hidrológico, CN_i el Número de Curva asignado a cada unidad y A el área total de la microcuenca Agarwal et al. (2024).

Posteriormente, se calculó la retención potencial máxima del suelo mediante:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

y la escorrentía directa se estimó con:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} - 1$$



donde S es la retención potencial máxima, CN el Número de Curva, P la precipitación de diseño y Q la escorrentía directa. Esta formulación permitió obtener la respuesta lluvia-escorrentía para cada periodo de retorno considerado.

Modelación hidrológica en HEC-HMS

La modelación hidrológica se realizó en HEC-HMS mediante la construcción del modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control. En el modelo de cuenca se incorporaron los elementos Subbasin, Reach y Sink, configurados según la delimitación hidrológica de la quebrada San Sebastián Pérez-Corredor et al. (2024). En el modelo meteorológico se ingresaron los hietogramas derivados del análisis probabilístico realizado en Hydrognomon, mientras que en las

especificaciones de control se definieron los intervalos temporales de simulación Agarwal et al. (2024).

El modelo utilizó como entradas principales el área aportante, el Número de Curva ponderado, el tiempo de concentración, el tiempo de retardo, la pendiente del cauce, la longitud de drenaje y la precipitación Guido et al. (2023). Con estos elementos se simuló la transformación de la lluvia en escorrentía directa para obtener hidrogramas de salida bajo diferentes periodos de retorno. Estudios previos en las quebradas San Sebastián y El Rosario han empleado HEC-HMS e Iber para estimar caudales y zonas inundables, lo que respalda la pertinencia metodológica del uso de modelación hidrológica en este contexto territorial (Lema Osorio & Suárez Venlasaga, 2023).

Tabla 3. Configuración general del modelo hidrológico

Módulo	Parámetro o entrada	Función dentro del modelo
Basin Model	Subbasin, Reach, Sink	Representar la estructura hidrológica
Loss Method	SCS-CN	Estimar pérdidas y exceso de lluvia
Transform Method	Hidrograma unitario	Convertir lluvia efectiva en caudal
Meteorologic Model	Hietogramas de diseño	Ingresar la lluvia por periodo de retorno
Control Specifications	Intervalo y duración	Definir el tiempo de simulación
Output	Hidrogramas	Obtener caudales máximos y respuesta temporal

Modelación de escenarios

La investigación consideró dos escenarios de simulación. El primer escenario correspondió a la condición actual de la microcuenca, considerando la cobertura y uso del suelo existente, el Número de Curva base y la respuesta lluvia-escorrentía sin intervención. El segundo escenario correspondió a una condición intervenida, en la cual las zonas críticas fueron reclasificadas mediante un uso de suelo modificado asociado a atenuadores de escorrentía.

La comparación entre ambos escenarios permitirá estimar la influencia de las medidas de manejo hídrico sostenible sobre la reducción del caudal pico, la disminución de la escorrentía superficial y la modificación del hidrograma de salida. Esta etapa se diseñó siguiendo la lógica de investigaciones recientes sobre atenuadores de escorrentía, en las que se integran herramientas SIG, análisis de pendiente, cobertura vegetal, Para esta etapa se aplicó la Guía Metodológica HIRO, utilizada para la identificación, clasificación y priorización de obras de

bioingeniería o medidas de atenuación de escorrentía. (Castillo Lescano, 2023).

Tipos de atenuadores de escorrentía aplicables al modelo HIRO.

Los atenuadores de escorrentía se incorporaron en la parte final del proceso metodológico como medidas de intervención territorial para modificar la respuesta hidrológica de la microcuenca. Estos dispositivos o prácticas se seleccionaron considerando su compatibilidad con el modelo SCS-CN, debido a que su efecto puede representarse mediante cambios en el uso del suelo, mejora de la cobertura vegetal, incremento de la infiltración y reducción del Número de Curva.

Para la microcuenca San Sebastián se consideraron cuatro tipos principales de atenuadores según la Guía Metodológica HIRO. El primero corresponde a la reforestación y restauración vegetal, aplicable en áreas con pérdida de cobertura o presión agropecuaria, con el propósito de incrementar la interceptación de lluvia y la rugosidad superficial. El segundo



corresponde a zanjas de infiltración y terrazas de retención, recomendadas para zonas de pendiente moderada a fuerte, donde se requiere disminuir la velocidad del escurrimiento y favorecer el almacenamiento temporal del agua. El tercero corresponde a barreras vivas y conservación de suelos,

orientadas a reducir la erosión superficial y el transporte de sedimentos. Finalmente, el cuarto corresponde al control de cárcavas y pequeñas estructuras de retención, útil en sectores donde la concentración del flujo genera incisión, arrastre de material y aporte rápido hacia el cauce principal.

Tabla 4. Atenuadores de escorrentía considerados para el escenario intervenido

Tipo de atenuador	Zona preferente de aplicación	Efecto esperado en el modelo
Reforestación y restauración vegetal	Coberturas degradadas y mosaico agropecuario	Reducción del CN y mayor infiltración
Zanjas de infiltración	Laderas con escorrentía concentrada	Retardo del flujo superficial
Terrazas de retención	Pendientes moderadas o fuertes	Almacenamiento temporal de lluvia
Barreras vivas	Áreas agrícolas y bordes de drenaje	Menor erosión y menor velocidad
Control de cárcavas	Zonas de incisión o erosión activa	Reducción del aporte rápido al cauce

De esta forma, los atenuadores no se incorporan como elementos aislados, sino como una modificación hidrológica del territorio. Su representación en el modelo se realizará mediante el ajuste del uso del suelo, el Número de Curva y las condiciones de infiltración de las áreas priorizadas. Con ello, la metodología permitirá comparar la respuesta actual de la microcuenca frente a una respuesta intervenida, aportando una base técnica para el manejo hídrico

sostenible y la mitigación de inundaciones en el cantón Guano.

Modelación hidráulica en HEC-RAS

Como complemento de la modelación hidrológica desarrollada en HEC-HMS, se realizó una simulación hidráulica bidimensional mediante HEC-RAS para representar espacialmente el comportamiento del flujo en el cauce principal de la microcuenca San Sebastián.

Los hidrogramas obtenidos en HEC-HMS fueron utilizados como condiciones de entrada en HEC-RAS, integrando un Modelo Digital de Elevación (MDE), la geometría del cauce y parámetros de rugosidad de Manning. La simulación permitió generar mapas de velocidad y profundidad del flujo para identificar sectores con mayor energía hidráulica, erosión potencial y concentración de escorrentía.

Los resultados hidráulicos fueron contrastados con los mapas de erosividad, permeabilidad, movimiento de masa y Número de Curva obtenidos mediante SIG y la metodología HIRO, permitiendo priorizar zonas críticas para la implementación de atenuadores de escorrentía y medidas de bioingeniería (Brunner, 2016; Guido et al., 2023).

3. Resultados y discusión

La delimitación hidrológica de la microcuenca San Sebastián permitió establecer la unidad de análisis para la modelación lluvia-escorrentía y para la posterior evaluación de atenuadores de escorrentía. La microcuenca fue representada en el

entorno de HEC-HMS a partir del área aportante, la red de drenaje, el cauce principal y el punto de salida, lo que permitió configurar el modelo mediante elementos tipo Subbasin, Reach y Sink.

Fig. 2. Mapa de delimitación de la microcuenca San Sebastián y red de drenaje principal.



Nota. La figura debe mostrar el polígono de la microcuenca, el cauce principal, drenajes secundarios, punto de salida y ubicación en el cantón Guano.

Los parámetros de diseño hidrológico permitieron representar la condición base de la microcuenca antes de la incorporación de atenuadores. Estos valores constituyen la entrada principal para el modelo HEC-HMS, especialmente el Número de Curva ponderado, la pendiente media, el área aportante,



la longitud de drenaje, el tiempo de concentración y el tiempo de retardo.

Tabla 5. *Parámetros de diseño hidrológico de la microcuenca San Sebastián*

Parámetro de diseño	Valor	Unidad
Número de Curva ponderado	70	-
Pendiente media	0,17	m/m
Área	10	km ²
Longitud de la red de drenaje	8,176	km
Tiempo de concentración, Kirpich	1,272	h
Tiempo de retardo	0,517	h
Tiempo de retardo	31,02	min

La configuración morfométrica e hidrológica evidencia una microcuenca con respuesta concentrada hacia la parte baja, especialmente por la pendiente media y la longitud de drenaje. Aunque la forma alargada tiende a distribuir la llegada del flujo en el tiempo, la pendiente y la presencia de coberturas agropecuarias y zonas intervenidas pueden favorecer la generación de escorrentía superficial. En este sentido, los parámetros presentados en la Tabla 5 funcionan como línea base para estimar la respuesta hidrológica actual y compararla con escenarios de manejo sostenible mediante atenuadores de escorrentía.

Los parámetros hidrológicos de la microcuenca San Sebastián evidencian una respuesta condicionada por la pendiente

media, la longitud de drenaje, el área aportante y el Número de Curva ponderado. Estos elementos permiten explicar la transformación de la precipitación en escorrentía directa, especialmente en zonas donde la cobertura vegetal ha sido modificada. En este sentido, el método SCS-CN resulta pertinente porque relaciona el uso del suelo, la infiltración y la generación de caudal pico, tal como se ha demostrado en estudios recientes sobre modelación hidrológica de cuencas intervenidas (Ekwule et al., 2024; Kourtis et al., 2025).

Validación estadística de precipitaciones máximas mediante Hydrognomon

La serie de precipitaciones máximas fue validada mediante el software Hydrognomon, aplicando la prueba de Kolmogorov-Smirnov para

contrastar diferentes distribuciones de probabilidad. Los resultados muestran que las distribuciones Normal, LogNormal, Gamma, Pearson III, Log Pearson III y EV1-Max fueron aceptadas en los niveles de significancia del 1 %, 5 % y 10 %, lo que indica consistencia estadística

de la serie para la estimación de eventos extremos. Esta validación resulta necesaria porque la modelación hidrológica depende directamente de la confiabilidad de las lluvias de diseño utilizadas para cada periodo de retorno.

Tabla 6. Validación de distribuciones de probabilidad mediante prueba Kolmogorov-Smirnov

Kolmogorov-Smirnov test for:All data	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	Attained α	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	61.30%	0.14976
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.02%	0.08192
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.98%	0.10381
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.65%	0.09979
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.54%	0.08528
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.28%	0.07954

La validación permitió comprobar que las distribuciones evaluadas son estadísticamente admisibles para representar los eventos máximos de precipitación. La distribución EV1-Max o Gumbel presentó el menor valor DMax, lo que evidencia un ajuste adecuado para eventos extremos; sin embargo, la serie de diseño empleada en Hydrognomon se trabajó con la distribución LNIII-mv, manteniendo coherencia con el procesamiento estadístico definido en la base de datos del estudio. Este comportamiento coincide con la práctica hidrológica aplicada en estudios de crecidas, donde se

contrastan varias funciones de distribución antes de seleccionar la lluvia de diseño para modelación.

Precipitaciones de diseño por periodo de retorno

A partir del análisis probabilístico en Hydrognomon se determinaron las precipitaciones de diseño asociadas a los periodos de retorno seleccionados. Estos valores fueron utilizados como entrada meteorológica para la simulación hidrológica en HEC-HMS, permitiendo estimar los caudales máximos de la microcuenca en escenarios de diferente recurrencia.



Tabla 7. Precipitación de diseño para diferentes periodos de retorno

Periodo de retorno, TR	Distribución	Precipitación ESPOCH
25 años	LNIII-mv	56,1
50 años	LNIII-mv	62,4
100 años	LNIII-mv	68,7
500 años	LNIII-mv	83,3

La Tabla 7 muestra un incremento progresivo de la precipitación de diseño conforme aumenta el periodo de retorno. Esta relación es esperada en análisis hidrológicos de extremos, ya que eventos menos frecuentes tienden a presentar mayor magnitud. En términos de gestión del riesgo, los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años son especialmente relevantes porque permiten evaluar escenarios críticos para la planificación de obras de control, medidas de bioingeniería y estrategias de mitigación de inundaciones.

La validación de las precipitaciones máximas mediante Hydrognomon permitió respaldar estadísticamente los valores de diseño utilizados en HEC-HMS. El incremento de la precipitación conforme aumenta el periodo de retorno confirma el comportamiento esperado de eventos extremos, lo cual es clave para estimar escenarios de riesgo hidrológico. Este procedimiento

fortalece la confiabilidad del modelo, ya que la calidad de los caudales simulados depende directamente del ajuste probabilístico de las lluvias máximas (Alahmadi & Rahman, 2020; Cheng et al., 2024).

Caudales máximos en condición actual

Con las precipitaciones de diseño validadas, el Número de Curva ponderado y los parámetros morfométricos de la microcuenca, se estimaron los caudales máximos para los periodos de retorno seleccionados. Los resultados evidencian una respuesta creciente del caudal en función del aumento de la precipitación, lo cual confirma la sensibilidad de la microcuenca frente a eventos extremos.

Tabla 8. Caudales máximos estimados para la condición actual de la microcuenca

Periodo	m3/s
25	5,00
50	6,90
100	9.60
500	17.70



Al contrastar estos resultados con los antecedentes específicos de la quebrada San Sebastián, se observa que el caudal de 6,90 m³/s para 50 años es superior al valor reportado por Lema Osorio y Suárez Venlasaga (2023) para la condición actual de la quebrada San Sebastián, donde se estimó un caudal máximo de 4,24 m³/s, y también supera ligeramente el escenario con cambio climático RCP 8.5, donde se obtuvo 6,14 m³/s. Esta diferencia puede explicarse por el tratamiento estadístico aplicado en el presente estudio, ya que las precipitaciones fueron ajustadas y validadas mediante Hydrognomon antes de ingresar al modelo hidrológico. Además, el uso del Número de Curva ponderado permite representar la influencia del uso del suelo y la cobertura vegetal en la producción de escorrentía, lo que puede generar variaciones respecto a otros modelos de la misma zona (Lema Osorio & Suárez Venlasaga, 2023).

Los caudales máximos estimados en la condición actual muestran una respuesta creciente de la microcuenca frente al aumento de la precipitación de diseño. Este

comportamiento confirma que la quebrada San Sebastián presenta sensibilidad hidrológica ante eventos extremos, especialmente por la combinación entre pendiente, cobertura vegetal y uso del suelo. Por ello, los valores obtenidos deben entenderse como escenarios probabilísticos de diseño y no como caudales históricos observados, lo cual permite sustentar técnicamente la necesidad de medidas preventivas de manejo hídrico sostenible (Lema Osorio & Suárez Venlasaga, 2023; Uquillas Saltos, 2023).

Después de modificar el uso del suelo mediante la propuesta de reforestación, los caudales máximos recalculados disminuyeron a 2,70 m³/s para 25 años, 4,10 m³/s para 50 años, 5,70 m³/s para 100 años y 10,60 m³/s para 500 años. Esta reducción se relaciona directamente con la disminución del Número de Curva en las unidades hidrológicas intervenidas, lo que representa un aumento de la retención potencial del suelo y una menor generación de escorrentía directa. En términos hidrológicos, la reforestación actúa como un atenuador porque incrementa la interceptación de lluvia, mejora la rugosidad superficial

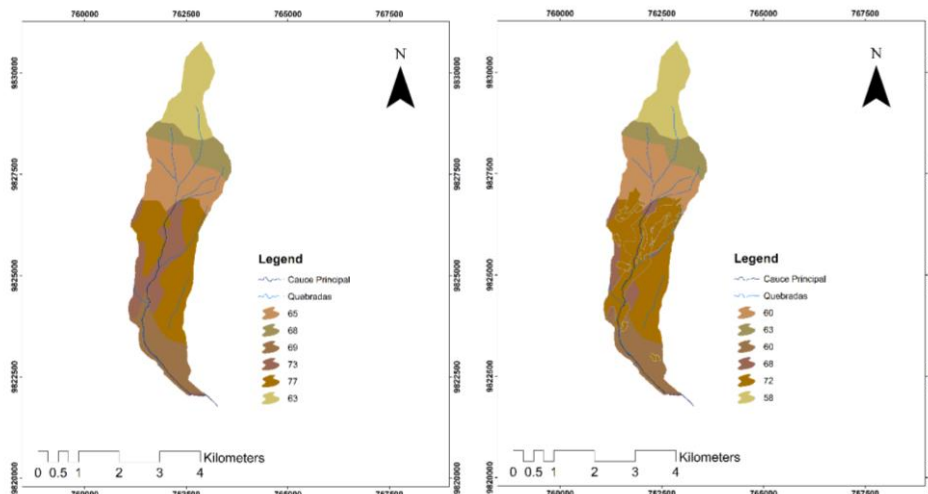
y favorece la infiltración, reduciendo así la magnitud del caudal pico en la salida de la microcuenca.

Identificación espacial de zonas críticas para atenuadores de escorrentía

La identificación de las zonas prioritarias para la implementación de atenuadores de escorrentía se realizó mediante la aplicación de la Guía Metodológica HIRO, la cual permite integrar variables físicas, hidrológicas y ambientales para seleccionar áreas aptas para obras

de bioingeniería. En este estudio, el análisis espacial consideró el Número de Curva, la permeabilidad, el movimiento de masa, la erosividad y la aptitud para reforestación. Como se observa en la Figura 3, el mapa de Número de Curva inicial y modificado permitió comparar la condición hidrológica actual de la microcuenca con el escenario intervenido, evidenciando que la reducción del CN en las zonas priorizadas mejora la capacidad de infiltración y disminuye la generación de escorrentía directa.

Fig. 3. Mapa de Número de Curva inicial y Número de Curva modificado.



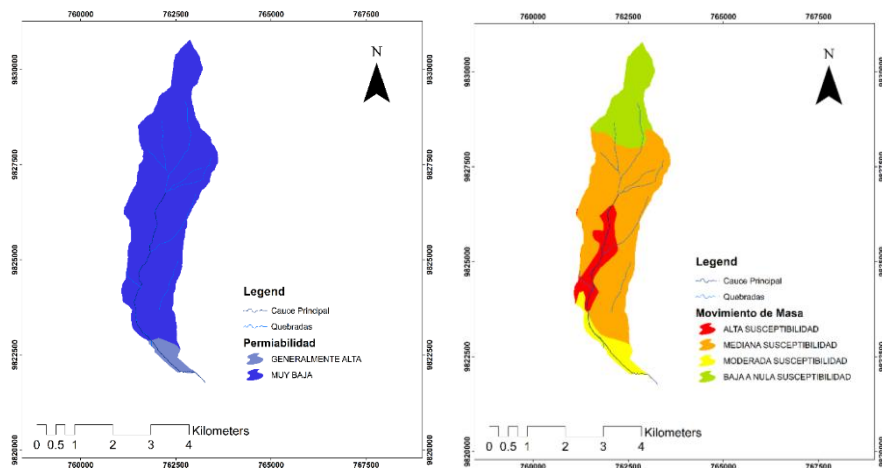
Asimismo, la Figura 4 muestra la relación entre movimiento de masa y permeabilidad, variables fundamentales para definir la viabilidad de las obras de bioingeniería. Las zonas con baja permeabilidad y susceptibilidad a

procesos de remoción requieren medidas que reduzcan la concentración del flujo superficial y establecen progresivamente el terreno. En este sentido, la metodología HIRO permitió reconocer sectores donde la

intervención debe orientarse no solo a reducir caudales, sino también a controlar procesos erosivos y de

inestabilidad asociados a lluvias intensas.

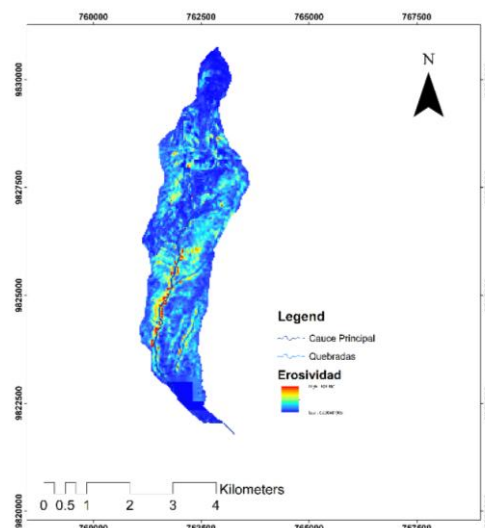
Fig. 4. Mapa de movimiento de masa y permeabilidad de la microcuenca San Sebastián.



Por otra parte, la Figura 5 presenta el mapa de erosividad, el cual permitió identificar áreas con mayor probabilidad de pérdida de suelo durante eventos de precipitación extrema. Estas zonas son críticas porque incrementan la escorrentía superficial y favorecen el transporte de sedimentos hacia el cauce

principal. Por ello, los sectores con mayor erosividad fueron considerados prioritarios para la aplicación de barreras vivas, conservación de suelos, control de cárcavas y restauración vegetal, medidas coherentes con los criterios de atenuación propuestos por la Guía HIRO.

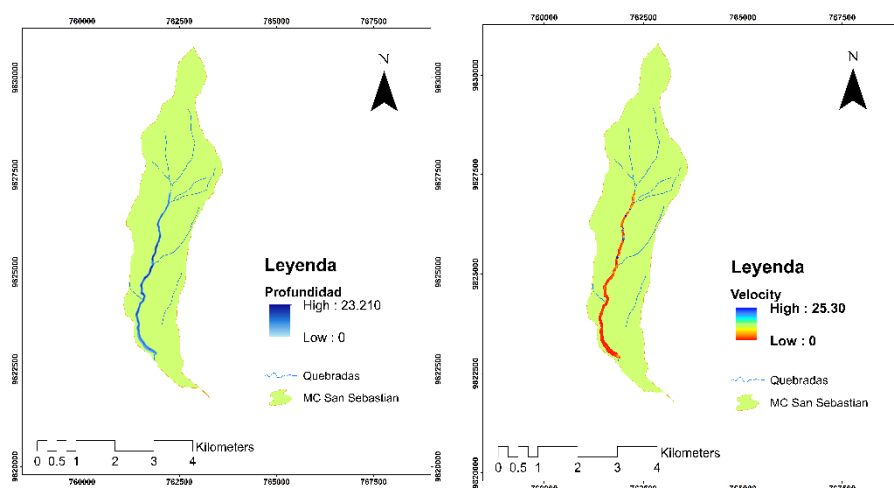
Fig. 5. Mapa de erosividad y priorización de zonas de intervención.



La Figura 5 sintetiza la aptitud territorial para la implementación de bioingeniería, particularmente mediante reforestación. Este mapa permitió ubicar las áreas donde la restauración vegetal puede actuar como atenuador principal de escorrentía, debido a su capacidad

para incrementar la cobertura del suelo, mejorar la infiltración y reducir el Número de Curva. De esta manera, la reforestación se integró al modelo hidrológico como una modificación del uso del suelo, permitiendo recalcular los caudales bajo un escenario intervenido.

Fig. 6. Mapas de velocidad y profundidad del flujo simulados mediante HEC-RAS para un periodo de retorno de 500 años en la microcuenca San Sebastián.



La Figura 6 presenta la simulación hidráulica desarrollada en HEC-RAS, utilizando un caudal máximo de 17,70 m³/s correspondiente al periodo de retorno de 500 años, obtenido previamente mediante la modelación hidrológica en HEC-HMS. Los resultados evidencian que las mayores velocidades del flujo se concentran en el cauce principal y en zonas de fuerte pendiente, mientras que las mayores profundidades se localizan en la parte baja de la microcuenca, donde converge la

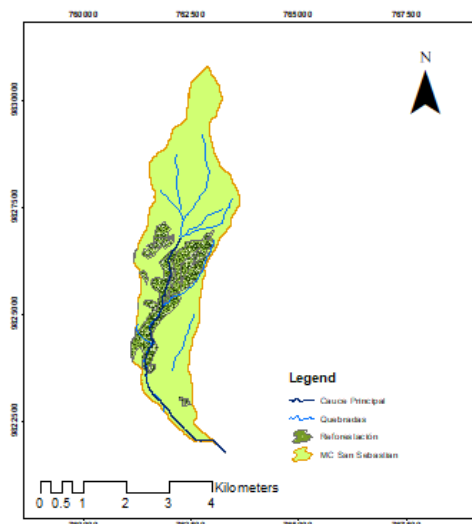
escorrentía superficial. De manera específica, la simulación reportó una profundidad máxima (Depth Max) de 23,210 m y una velocidad máxima (Velocity Max) de 25,30 m/s, lo cual confirma la presencia de sectores con alta concentración de flujo. En conjunto, estas condiciones reflejan una elevada energía hidráulica y un mayor potencial erosivo del sistema fluvial (Brunner, 2016).

Asimismo, las zonas con mayores velocidades y profundidades coinciden con áreas previamente

identificadas como críticas en los mapas de erosividad, permeabilidad y susceptibilidad a movimientos de masa. Este comportamiento confirma la relación entre pendiente, concentración de escorrentía y procesos de erosión hídrica, especialmente durante eventos extremos de precipitación. En este

sentido, los resultados respaldan técnicamente la implementación de medidas de bioingeniería, reforestación y control de cárcavas para disminuir la energía hidráulica y reducir el riesgo de inundaciones en la microcuenca San Sebastián (Guido et al., 2023).

Fig. 7. Mapa de aptitud para bioingeniería mediante reforestación en la microcuenca San Sebastián.



En conjunto, las Figuras 3, 4, 5 y 6 sustentan espacialmente la selección de los atenuadores de escorrentía propuestos para la microcuenca San Sebastián. La integración de estos mapas permitió identificar zonas críticas donde la reforestación, el control de cárcavas, las barreras vivas y las prácticas de conservación de suelos pueden contribuir a reducir la escorrentía superficial y mitigar el riesgo de

inundaciones en la parte baja del cantón Guano.

La identificación espacial de zonas críticas mediante Número de Curva, permeabilidad, erosividad, movimiento de masa y aptitud para reforestación permitió orientar técnicamente la localización de las medidas de bioingeniería. Esta priorización es importante porque los atenuadores no deben aplicarse de forma generalizada, sino en áreas donde puedan generar mayor efecto



hidrológico. Por ello, la reforestación debe complementarse con zanjas de infiltración, terrazas, barreras vivas y control de cárcavas, especialmente en zonas con escorrentía concentrada o erosión activa (Griffiths et al., 2024; Lalonde et al., 2024).

Tabla 9. Comparación de caudales máximos actuales y caudales con reforestación en la microcuenca San Sebastián

Periodo de retorno	Caudal actual	Caudal con reforestación	Reducción absoluta	Reducción porcentual
25 años	5,00 m ³ /s	2,70 m ³ /s	2,30 m ³ /s	46,00 %
50 años	6,90 m ³ /s	4,10 m ³ /s	2,80 m ³ /s	40,58 %
100 años	9,60 m ³ /s	5,70 m ³ /s	3,90 m ³ /s	40,63 %
500 años	17,70 m ³ /s	10,60 m ³ /s	7,10 m ³ /s	40,11 %

La comparación entre el escenario actual y el escenario con reforestación demuestra que los atenuadores de escorrentía tienen un efecto significativo en la reducción del caudal pico. Los caudales disminuyeron de 5,00 a 2,70 m³/s para 25 años, de 6,90 a 4,10 m³/s para 50 años, de 9,60 a 5,70 m³/s para 100 años y de 17,70 a 10,60 m³/s para 500 años. Estas reducciones, entre 40,11 % y 46,00 %, evidencian que la reforestación reduce el Número de Curva, mejora la infiltración y disminuye la escorrentía directa. Resultados similares han sido reportados en investigaciones recientes sobre soluciones basadas en la naturaleza aplicadas a la mitigación de inundaciones (Agarwal et al., 2024; Pérez-Corredor et al., 2024).

La reducción porcentual del caudal fue mayor en el periodo de retorno de 25 años, con 46,00 %, y se mantuvo cercana al 40 % en los periodos de 50, 100 y 500 años. Este comportamiento indica que la reforestación tiene mayor capacidad relativa de atenuación en eventos menos extremos, pero conserva un efecto importante incluso en eventos de mayor magnitud. Desde el punto de vista del manejo hídrico, esto significa que la cobertura vegetal no elimina completamente el riesgo de inundación, pero sí disminuye la energía del sistema y reduce la cantidad de agua que llega rápidamente hacia la zona baja del cantón Guano.

Estos resultados deben relacionarse con las características propias de la microcuenca San Sebastián.

Uquillas Saltos (2023) identificó que esta unidad presenta una combinación de páramo, mosaico agropecuario, vegetación arbustiva, plantación forestal y área poblada, condiciones que influyen en la infiltración, la escorrentía y la respuesta del cauce durante eventos de lluvia. Por ello, la disminución del Número de Curva mediante reforestación resulta coherente con la dinámica biofísica de la microcuenca, ya que las áreas con cobertura degradada o uso agropecuario pueden transformarse en zonas de mayor retención hídrica si son intervenidas con especies vegetales adecuadas y prácticas de conservación de suelos.

4. Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran que el manejo hídrico sostenible mediante atenuadores de escorrentía constituye una estrategia técnicamente viable para reducir la amenaza por inundaciones en microcuencas andinas con limitada información hidrométrica. La integración de Hydrognomon, HEC-HMS, HEC-RAS, el método SCS-CN y la priorización espacial mediante la Guía Metodológica HIRO permitió

desarrollar un enfoque metodológico robusto para representar la respuesta hidrológica e hidráulica de la microcuenca San Sebastián.

La modelación hidrológica evidenció que la microcuenca presenta una respuesta sensible frente al incremento de la precipitación de diseño. En la condición actual, los caudales máximos estimados fueron de 5,00; 6,90; 9,60 y 17,70 m³/s para periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años, respectivamente, confirmando que la pendiente, el uso del suelo y la cobertura vegetal influyen directamente en la generación de escorrentía superficial y en el incremento del riesgo de inundación en las zonas bajas del cantón Guano.

La simulación hidráulica desarrollada en HEC-RAS permitió identificar espacialmente sectores con mayores velocidades y profundidades del flujo durante el escenario extremo de 500 años. Las zonas críticas coincidieron con áreas de elevada erosividad, baja permeabilidad y susceptibilidad a movimientos de masa, evidenciando la relación entre la dinámica hidráulica y los procesos de degradación del suelo. Estos



resultados fortalecen la identificación de áreas prioritarias para medidas de bioingeniería y control de escorrentía.

El escenario intervenido demostró que la reforestación y la modificación del uso del suelo reducen significativamente el Número de Curva y, en consecuencia, la magnitud de los caudales pico. Los caudales recalculados disminuyeron a 2,70; 4,10; 5,70 y 10,60 m³/s, con reducciones entre 40,11 % y 46,00 %, evidenciando que las soluciones basadas en la naturaleza poseen un efecto hidrológico e hidráulico importante sobre la reducción de la escorrentía superficial y la energía del flujo.

La integración de mapas de Número de Curva, erosividad, permeabilidad, movimiento de masa y simulación hidráulica permitió priorizar técnicamente zonas aptas para reforestación, barreras vivas, zanjas de infiltración y control de cárcavas. En conjunto, estas medidas contribuyen a disminuir la velocidad del flujo, mejorar la infiltración y reducir el potencial erosivo de la microcuenca San Sebastián, consolidando una propuesta de

manejo hídrico sostenible aplicable a cuencas andinas con problemáticas similares.

Bibliografía

- Agarwal, D. S., Bharat, A., Kjeldsen, T. R., & Adeyeye, K. (2024). Assessing impact of nature based solutions on peak flow using HEC-HMS. *Water Resources Management*, 38, 1125–1140. doi: 10.1007/s11269-023-03712-9
- Castro Solórzano, F. (2023). Atenuadores de escorrentía para la quebrada Cañitas, parroquia Charapotó, Manabí, utilizando herramientas SIG. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 01–28. https://doi.org/10.37811/cl_rm.v7i4.6841
- Castillo Lescano, J. A. (2023). Manejo sostenible de cuencas con atenuadores de escorrentía aplicando SIG y simulación semidistribuida. *Polo del Conocimiento*, 8(7), 153–174.
- Duque-Sarango, P., & Patiño, D. M. (2019). Evaluación del sistema de modelamiento hidrológico HEC-HMS para la simulación hidrológica de una microcuenca andina tropical. *Información Tecnológica*, 30(6), 351–362. doi:



10.4067/S0718-
07642019000600351

- Eke, E., Parker, G., & Shimizu, Y. (2014). Numerical modeling of erosional and depositional bank processes in migrating river bends with self-formed width: Morphodynamics of bar push and bank pull. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(7), 1455–1483. doi: 10.1002/2013JF003020
- Giler-Ormaza, A. M., Donoso Lucas, S. P., Arteaga Zambrano, R. P., & Zaldumbide Perlalvo, D. A. (2020). Manejo sostenible de inundaciones, cuencas y riberas en la provincia de Manabí. *La Técnica. Revista de las Agrociencias*, 10(1), 55–72. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i23.1442
- Guido, B. I., Popescu, I., Samadi, V., & Bhattacharya, B. (2023). An integrated modeling approach to evaluate the impacts of nature-based solutions of flood mitigation across a small watershed in the southeast United States. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 2663–2681. doi: 10.5194/nhess-23-2663-2023
- Kourtis, I. M., Perdikaki, M., Zacharakis, I., & Tsihrintzis, V. A. (2025). An online tool and open database for curve number data retrieval in Europe used for estimating runoff from precipitation events. *Environmental Earth Sciences*, 84, 650. doi: 10.1007/s12665-025-12637-y
- Lalonde, M., Drenkhan, F., Rau, P., Baiker, J. R., & Buytaert, W. (2024). Scientific evidence of the hydrological impacts of nature-based solutions at the catchment scale. *WIREs Water*, 11(5), e1744. doi: 10.1002/wat2.1744
- Lema Osorio, R. M., & Suárez Venlasaga, D. A. (2023). Efectos del cambio climático en zonas urbanas aledañas a las quebradas San Sebastián y El Rosario del cantón Guano [Trabajo de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo].
- Morales Gutama, E. H., Paredes Parra, C. D. C., & Reyes Zambrano, J. L. (2024). Implementación de estrategias de manejo sostenible en la microcuenca Visquije, Santa Ana: Uso de atenuadores de escorrentía y tecnologías SIG. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 9711–9732. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.12112
- Pérez-Corredor, L., Hume, S. E., Alivio, M. B., & Bezak, N. (2024). Exploring the impact of nature-based solutions for hydrological extremes mitigation in small mixed urban-forest catchment.



Applied Sciences, 14(24),
11813. doi:
10.3390/app142411813

Schuurman, F., Shimizu, Y., Iwasaki,
T., & Kleinhans, M. G. (2016).
Dynamic meandering in
response to upstream
perturbations and floodplain
formation. *Geomorphology*,
253, 94–109. doi:
10.1016/j.geomorph.2015.05.
039

Uquillas Saltos, J. V. (2023).
Caracterización de la
microcuenca San Sebastián,
afluente del río Guano, del
cantón Guano, provincia de
Chimborazo [Trabajo de
Integración Curricular,
Escuela Superior Politécnica
de Chimborazo].

Venditti, J. G., et al. (2021).
Turbulence and sediment
transport. *Annual Review of
Fluid Mechanics*.

USACE Hydrologic Engineering
Center. (2024). *SCS Curve
Number Loss Model*. HEC-
HMS Technical Reference
Manual. U.S. Army Corps of
Engineers