



**Pontificia Universidad
Católica del Ecuador**
Seréis mis testigos

MANABÍ

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
SEDE MANABÍ
CARRERA DE HIDRÁULICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
ESTIMACIÓN INDIRECTA DE CAUDALES PARA LAS INUNDACIONES
REPENTINAS EN EL SECTOR LA CARMELA DEL CANTÓN CHONE**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
GESTIÓN SOSTENIBLE Y APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS
NATURALES**

**PREVIO AL TÍTULO DE
INGENIERO HIDRÁULICO**

**AUTOR
FREDDY EDUARDO ZAMBRANO VÁSQUEZ**

**TUTOR
ING. FABIAN RODRIGO ESPINALES CEDEÑO, M.SC.**

PORTOVIEJO, DICIEMBRE 2023

Certificación de la Tesis

Ing. Fabian Rodrigo Espinales Cedeño, M.Sc.

Tutor del plan de investigación curricular

En mi calidad de tutor del trabajo de integración curricular, certifico haber revisado el presente manuscrito de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí, cumpliendo la Normativa del Trabajo de Integración Curricular; en consecuencia, es apto para su presentación y sustentación.

Ing. Fabian Rodrigo Espinales Cedeño, M. Sc.

C.I. 130659765-7

Aprobación del Tribunal

El jurado examinador aprueba el presente trabajo de integración curricular en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí:

(F)_____

Ing. Fabian Rodrigo Espinales Cedeño, M. Sc.

Presidente del Tribunal

(F)_____

Ing., José Ramón Alarcón Loor, M. Sc.

Primer Lector

(F)_____

Ing., John Enrique Félix Mera, M. Sc.

Segundo Lector

Declaración de Originalidad

Este manuscrito, no contiene ningún tipo de material que ha sido aceptado para la obtención de un título universitario en otra institución, excepto en la información de soporte que ha sido debidamente citada en mi trabajo. Este trabajo es de total responsabilidad del autor, quien declara bajo juramento que ninguna sección de este trabajo de integración curricular infringe los derechos de autor de nadie.

Autor:

F. _____
Freddy Eduardo Zambrano Vásquez
Dirección: Chone, Cdla. Bowen
E-mail: fzambrano1249@pucesm.edu.ec
Celular: 0985799595

Declaración de Derecho del Autor

Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, a distribuir este manuscrito de investigación en medios físicos y electrónicos, con el fin de promover la divulgación de mis resultados a la comunidad científica y a la sociedad en general. Adicionalmente autorizo el uso de los contenidos de esta investigación como bibliografía para fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, citando como fuente de información al autor de este trabajo.

Autor:

F. _____
Freddy Eduardo Zambrano Vásquez
C.I: 1313821249

Dedicatoria y Agradecimiento

En este proceso de titulación está dedicado a Dios y a mi familia que han sido pilar fundamental como apoyo emocional y también académico, han sido la inspiración para que continúe con mi formación académica, y de grata manera este trabajo investigativo es dedicado a mi madre Liliana Vásquez que por sobre todas las cosas, con su paciencia, su sabiduría y experiencia en la vida, ha sabido aconsejarme y guiarme para que pueda llegar cumplir cada meta y hacer de esto posible.

Agradezco infinitamente a cada persona que tope en este camino académico, que me brindaron su apoyo desinteresado y una amistad sincera, a aquellas personas que hoy Dios no las tiene con nosotros en este plano terrenal, pero que sin ellas hoy no podría haber llegado a cumplir este objetivo de vida.

Resumen

Esta investigación cuantitativa estableció de manera indirecta el caudal para inundaciones repentinas a fin de mitigar las inundaciones. Para ello se generó un estudio exploratorio desde julio a septiembre del 2023 en el sitio la Carmela del cantón Chone, mediante la recopilación de las condiciones del canal para generar el cálculo hidráulico del flujo que transita por él, considerando la ecuación de Manning, el método racional, el método del Hidrograma Unitario Triangular y mediante una simulación hidrológica en el software HEC-HMS con un periodo de retorno de 2 años. Los resultados señalan una sección aproximadamente rectangular para el canal con una altura de 1,65 m y un ancho de 12,5 m durante un evento de crecida repentina, con una pendiente de 0,005 m/m con coeficiente de fricción (n - Manning) igual a 0,08, a partir de lo cual se estimó una velocidad de 2,07 m/s mediante el método Bernoulli y de 2,77 m/s mediante el método del flotador, en promedio 1,96 m/s; se determinaron los caudales de tránsito mediante Manning de 21,73 m³/s, mediante el método racional de 26,38 m³/s, mediante el hidrograma unitario triangular de 26,28 m³/s, y mediante la simulación hidrológica de 26,50 m³/s; los cuales al compararlos entre si muestran un mismo orden de magnitud, pero el método de Manning subestima el caudal en un 17,3% menos en relación a las demás metodologías (una diferencia de 4,55 m³/seg). Se concluye que el uso de varias metodologías reduce la incertidumbre al estimar caudales.

Palabras clave: datos, simulación, comparación

Abstract

Esta investigación cuantitativa estableció de manera indirecta los caudales por inundaciones repentinas en el sector La Carmela, cantón Chone, a fin de atenuarlas. Para ello, se desarrolló este estudio exploratorio desde julio hasta septiembre de 2023, mediante la recopilación de las características del canal para calcular hidráulicamente el flujo que transita por él, considerando la ecuación de *Manning*, el método Racional, el método del Hidrograma Unitario Triangular y mediante una simulación hidrológica en el *software Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System [HEC-HMS]* con un periodo de retorno de 2 años. Los resultados señalan una sección aproximadamente rectangular para el canal con una altura de 1,65 m y un ancho de 12,5 m durante una crecida repentina, con una pendiente de 0,005 m/m con coeficiente de fricción (*n - Manning*) igual a 0,08, a partir del cual se estima una velocidad de 2,07 m/s mediante el método *Bernoulli* y de 2,77 m/s mediante el método del flotador, en promedio 1,96 m/s. Los resultados de los caudales de tránsito determinados corresponden a 21,73 m³/s mediante *Manning*; 26,38 m³/s mediante el método Racional; 26,28 m³/s mediante el hidrograma unitario triangular; y 26,50 m³/s mediante la simulación hidrológica, los cuales al ser mutuamente comparados muestran un mismo orden de magnitud, aunque el método de *Manning* subestima el caudal en 17,3% menos en relación a los otros, con una diferencia de 4.55 m³/seg . Se concluye que el uso de varias metodologías reduce la incertidumbre al estimar caudales.

Keywords: data, simulation, comparison

Índice

Certificación de la Tesis	ii
Aprobación del Tribunal.....	iii
Declaración de Originalidad.....	iv
Declaración de Derecho del Autor	v
Dedicatoria y Agradecimiento.....	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice de Tabla	11
Índice de Figuras	12
Índice de Fórmulas	13
Introducción.....	14
Objetivos.....	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos	16
Materiales y Métodos	17
Tipo de investigación	17
Características del lugar	17
Localización	17
Ubicación Geográfica.....	18
Condiciones climatológicas.....	18
Equipos y materiales	19

	10
Materiales de campo.....	19
Materiales de oficina	19
Métodos	20
Caudal mediante el método de Manning	20
Caudal mediante el método Racional	24
Caudal de máxima crecida mediante el Hidrograma Unitario Triangular	24
Caudal mediante modelación hidrológica en HEC-HMS	26
Número de escurrimiento.	29
Resultados.....	31
Caudal de tránsito mediante un video durante una crecida repentina	31
Caudales de Diseño mediante una Simulación Hidrológica.....	32
Caudal de diseño mediante Método Racional	36
Caudal para máximas crecidas mediante el método del Hidrograma Unitario Triangular.	36
Comparación de los Caudales de Diseño	37
Discusión	38
Conclusiones.....	40
Bibliografía.....	41
Anexos	46

Índice de Tabla

Tabla 1: Condiciones climatológicas mensuales promedio desde el año 2013 al 2022 ...	18
Tabla 2: Valores de coeficientes de rugosidad (n).....	23
Tabla 3: Datos del tránsito en el sector la Carmela durante una crecida repentina	31
Tabla 4: Parámetros hidráulicos, velocidades y caudal de tránsito	31
Tabla 5: Parámetros morfométricos de la cuenca hídrica en el sector la Carmela	33
Tabla 6: Parámetros morfométricos del canal de Tránsito	33
Tabla 7: Número de curva para cada subcuenca en el sector la Carmela	34
Tabla 8: Precipitación máxima en 24 horas desde el año 2013 al 2022	35
Tabla 9: Caudales máximos para las quebradas según su periodo de retorno	35
Tabla 10: Comparación de caudales de tránsito durante una crecida repentina	37
Tabla 11: Grupos hidrológicos del suelo (SCS).	46
Tabla 12: Tabla para considerar variables según el número de datos	47

Índice de Figuras

Figura 1: Sectores la Carmela, Chone - Ecuador	17
Figura 2: Sector la Carmela delimitado en HEC-HMS.....	32
Figura 3: Hidrograma Unitario Triangular.....	36
Figura 4: Toma de las características del canal en el sector la Carmela	48
Figura 4: Toma de las características del canal en el sector la Carmela	49
Figura 5: Video durante inundación repentina en el sector la Carmela	50
Figura 6: Hietograma para un periodo de retorno de 2 años en el sector la Carmela	51

Índice de Fórmulas

Fórmula 1: Velocidad mediante Bernoulli	20
Fórmula 2: Velocidad mediante el flotador	21
Fórmula 3: Área mojada sección rectangular	21
Fórmula 4: Perímetro mojado sección Rectangular	22
Fórmula 5: Radio hidráulico	22
Fórmula 6: Número de Froude	22
Fórmula 7: Caudal mediante Manning	23
Fórmula 8: Método Racional	24
Fórmula 9: Tiempo de retraso	25
Fórmula 10: Duración en exceso	25
Fórmula 11: Tiempo pico	25
Fórmula 12: Caudal pico	26
Fórmula 13: Número de escurrimiento	29
Fórmula 14: Distribución de Gumbel	30

Introducción

Las inundaciones, como las que afectan periódicamente a zonas urbanas y rurales en América Latina, son el resultado del desbordamiento de los límites de los cursos de agua debido a intensas precipitaciones en un corto período de tiempo (Arreguín *et al.*, 2016); lo cual ha dado origen a los desastres naturales de gran magnitud suscitados en América Latina que han conllevado a pérdidas humanas y materiales, debido a la carente respuesta por parte de las entidades gubernamentales con planes para su mitigación (Coral y Stefan, 2016; Fischer, 2021).

Una medida fundamental para prevenir y mitigar los efectos de estas inundaciones es la implementación de sistemas de alerta temprana, los cuales les permiten a las comunidades vulnerables analizar los riesgos y tomar acciones adecuadas en caso de inundaciones repentinas (García *et al.*, 2020), complementada con los sistemas basados en medidas estructurales y de bioingeniería, diseñadas para adaptarse a las condiciones específicas de cada cuenca hídrica y a los datos pluviométricos de las estaciones meteorológicas, evitando tanto el su dimensionamiento como el sobredimensionamiento de las obras (Groch y Cogliati, 2022; Mauriño, 2013).

Un ejemplo de un área propensa a inundaciones es el cantón Chone, ubicado en la provincia de Manabí, que experimenta inundaciones durante los meses de alta precipitación, especialmente entre diciembre y mayo, debido al aumento del caudal del Río Chone y sus afluentes, como el Río Grande, Río Mosquito y Río Garrapata (Hidalgo y Boelens, 2018). Un evento reciente, en marzo de 2023, provocó la declaración de emergencia en el cantón debido a deslizamientos de tierra e inundaciones en el sector La Carmela, lo que resultó en el anegamiento del 90% de las calles céntricas (EL COMERCIO, 2023); y las ocurridas en el año 1993 durante

el fenómeno El Niño donde se vieron afectadas 15 provincias junto a los cantones manabitas Portoviejo, Chone y Manta (Gómez *et al.*, 1996).

Para estimar los caudales durante eventos de crecida en el cantón Chone, se pueden utilizar métodos directos e indirectos. Los métodos directos involucran instrumentos y procedimientos en campo, como el uso de molinetes, dooples acústicos, aforo de vertederos, trazadores y limnógrafos (Domingos *et al.*, 2014; Sánchez, 2013); o los métodos indirectos como la ecuación empírica de Manning que considera las condiciones del cauce, una simulación hidrológica en softwares como HEC-HMS, a través del método racional, o mediante fotos y videos durante los eventos de crecidas (López, 2016).

Un desafío importante para estimar con precisión los caudales en el país es la falta de información meteorológica confiable debido a la falla de algunas estaciones o al procesamiento inadecuado de los datos (Giler *et al.*, 2020). Por lo tanto, es fundamental abordar este problema procesando cuidadosamente la información, eliminando datos atípicos que puedan distorsionar los resultados y completando la información faltante mediante métodos especializados y el uso de estaciones cercanas (Reyes, 2023).

Dada esta problemática, esta investigación se propone estimar los caudales para inundaciones repentinas en el Sector La Carmela, en el cantón Chone, mediante métodos indirectos. Para lograr este objetivo, se llevarán a cabo los siguientes objetivos específicos: recopilar información de campo sobre las secciones del cauce principal y los niveles máximos registrados utilizando recursos multimedia, como videos y fotografías; calcular las velocidades y caudales mediante ecuaciones de los métodos de Bernoulli, Flotador y Manning basados en la información de campo; y comparar los caudales obtenidos mediante métodos hidráulicos indirectos utilizando herramientas informáticas especializadas.

Objetivos

Objetivo General

Estimar de forma indirecta los caudales para inundaciones repentinas en el Sector La Carmela utilizando métodos indirectos hidráulicos e hidrográfico.

Objetivos Específicos

Recolectar información de campo sobre secciones transversales del cauce principal de la cuenca para obtener áreas, inclinaciones longitudinales y transversales, y niveles máximos de agua registrados en recursos multimedia como videos y fotos de inundaciones.

Calcular las velocidades y caudales utilizando las ecuaciones de los métodos de Manning, Bernoulli, basadas en fuentes de información de campo y bibliografía sustentada.

Realizar una comparación entre caudales obtenidos mediante métodos hidráulicos indirectos utilizando herramientas informáticas especializadas.

Materiales y Métodos

Tipo de investigación

Se generó una investigación de tipo cuantitativa para estimar los caudales de forma indirecta durante inundaciones repentinas en el Sector La Carmela.

Características del lugar

Localización

La investigación se ejecutó en la comunidad la Carmela de la parroquia rural Santa Rita del cantón Chone perteneciente a la provincia de Manabí, desde agosto a septiembre del 2023.

Figura 1

Sector La Carmela, Chone – Ecuador.



Fuente: MAPACARTA (2023)

Ubicación Geográfica

Datum: WGS 1984 UTM zona 17 S.

Coordenada Sur (X): 609558,4.

Coordenada Oeste (Y): 9926747,5.

Condiciones climatológicas**Tabla 1**

Condiciones climatológicas mensuales promedio desde el año 2013 al 2022.

Mes	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Insolación (horas)	Precipitación (mm)
Enero	22,80	29,31	85	2,05	49,8	212,94
Febrero	22,91	29,74	85	2,04	77,8	289,19
Marzo	23,16	30,54	85	2,11	60,1	276,68
Abril	23,14	30,54	85	2,04	78,4	162,29
Mayo	22,72	29,68	86	2,04	55,9	95,42
Junio	21,98	28,79	86	1,92	49,4	39,49
Julio	21,58	28,55	85	2,01	58,4	20,43
Agosto	21,30	28,84	83	2,12	93,2	4,76
Septiembre	21,49	29,07	83	2,16	78,6	10,93
Octubre	21,43	28,90	83	2,10	59,9	16,77
Noviembre	21,44	28,63	82	2,17	68,7	7,37
Diciembre	21,90	28,70	82	2,00	60,7	71,8

Fuente: INAMHI (2023)

Equipos y materiales***Materiales de campo***

Cámara fotográfica.

GPS móvil.

Flexómetro.

Cinta métrica.

Porta hojas acrílico.

Materiales de oficina

Cuaderno.

Software Excel.

Software Word.

Software AutoCAD

Software HEC-HMS.

Métodos

Para estimar el caudal durante inundaciones repentinas en el sector la Carmela del cantón Chone, se utilizaron videos durante inundaciones suscitadas en la zona para deducir las velocidades de tránsito mediante el método de Bernoulli y del flotador, y con las secciones levantadas en campo del canal determinar el caudal mediante el método de Manning, valores que fueron comparados con los resultados de una modelación hidrológica semi distribuida efectuada en el software HEC-HMS.

Caudal mediante el método de Manning

Para la estimación del caudal de tránsito de un canal abierto mediante la fórmula de Manning, inicialmente se estimó la velocidad del agua mediante videos disponibles después de las inundaciones suscitadas en el sector la Carmela, considerando las referencias de incrementos frente a obstáculos, y la distancia que recorren objetos como basuras o escombros en un determinado tiempo (Lumbroso y Gaume, 2012).

Velocidad mediante Bernoulli.

$$v = \sqrt{2g * \Delta Z * C}$$

Fórmula 1. Velocidad mediante Bernoulli.

Donde:

V = Velocidad (m/seg).

g = Gravedad (m/s²).

ΔZ = Diferencia de altura.

C = Factor de corrección (0,79).

Velocidad mediante el Flotador.

$$V = \frac{e}{t} * C$$

Fórmula 2. Velocidad mediante el flotador.

Donde:

V = Velocidad (m/seg).

e = Espacio (m).

t = Tiempo (seg).

C = Factor de corrección (0,79).

Una vez identificado el lugar donde fue tomado el video de referencia para el cálculo de las velocidades, se acudió a campo para medir las secciones del canal, considerando su calado, ancho, pendiente y condiciones de la zona para estimar su área mojada, perímetro mojado, radio hidráulico, número de Froude y coeficiente de fricción (n), con las fórmulas descritas a continuación según señala Chow (1994a):

Área Mojada.

$$Am = b * h$$

Fórmula 3. Área mojada sección rectangular.

Donde:

Am = Área mojada (m²).

b = Base (m).

h = Altura (m).

Perímetro Mojado.

$$\mathbf{Pm} = b + 2 * h$$

Fórmula 4. Perímetro mojado sección Rectangular.

Donde:

Pm = Perímetro mojado (m).

b = Base (m).

h = Altura (m).

Radio Hidráulico.

$$\mathbf{Rh} = \frac{Am}{Pm}$$

Fórmula 5. Radio hidráulico.

Donde:

Rh = Radio hidráulico (m).

Am = Área mojada (m²).

Pm = Perímetro mojado (m).

Número de Froude.

$$\mathbf{F} = \frac{v}{\sqrt{g * L}}$$

Fórmula 6. Número de Froude.

Donde:

F = Número de Froude.

v = Velocidad (m/seg).

g = Gravedad (m/s²).

L = Tirante hidráulico (m).

Caudal mediante Manning.

$$Q = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Fórmula 7. Caudal mediante Manning.

Donde:

Q = Caudal (m³/s) .

n = Coeficiente de rugosidad (ver tabla 2).

R = Radio hidráulico (m).

S = Pendiente longitudinal (m/m).

Tabla 2

Valores de coeficientes de rugosidad (n).

	Número de datos	Mínimo	Normal	Máximo
a.	En tierra, recto y uniforme			
	1. Limpio, recientemente terminado	0,016	0,018	0,020
	2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0,018	0,022	0,025
	3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0,022	0,025	0,030
	4. Con pastos cortos, algunas malezas	0,022	0,027	0,033
b.	En tierras, serpenteante y lento			
	1. Sin vegetación	0,023	0,025	0,020
	2. Pastos, algunas malezas	0,025	0,030	0,033
	3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0,030	0,035	0,040
	4. Fondo en tierra con lados en piedra	0,028	0,030	0,035
	5. Fondos pedregosos y bancas con maleza	0,025	0,035	0,040
	6. Fondos en cantos rodeados y lados limpios	0,030	0,040	0,050
c.	Excavado con pala o dragado			
	1. Sin vegetación	0,025	0,028	0,033
	2. Matorrales ligeros en las bancas	0,035	0,050	0,060
d.	Cortes en roca			
	1. Lisos y uniformes	0,025	0,035	0,040
	2. Afiliados y regulares	0,035	0,040	0,050
e.	Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
	1. Malezas densas, tan altas como la profundidad del flujo	0,050	0,080	0,120
	2. Fondos limpios, matorrales en los lados	0,040	0,050	0,080
	3. Igual, nivel máximo de flujo	0,045	0,070	0,110
	4. Matorrales densos, altos niveles	0,080	0,100	0,140

Fuente: Chow, 1994b.

Caudal mediante el método Racional

Es uno de los métodos ampliamente empleado en el cálculo de caudales máximos de crecida es este método, especialmente adecuado para cuencas con dimensiones inferiores a 200 km^2 . Su utilidad radica en la especificidad de los patrones pluviales locales, siendo crucial que la lluvia sea localizada para poder considerarla uniformemente distribuida en el área bajo análisis. Según afirmaciones de Chow (1994a), este método es reconocido por su aplicabilidad en contextos de menor escala hidrográfica.

$$Q = 0,28 * C * I * A$$

Fórmula 8. Método Racional.

Donde:

Q = Caudal (m^3/s) .

C = Coeficiente de escorrentía (adimensional).

I = Intensidad de lluvia (mm/h).

A = Área de escurrimiento (hectárea).

Caudal de máxima crecida mediante el Hidrograma Unitario Triangular

Se creó un hidrograma unitario artificial con una forma triangular simple, aunque no refleja la forma exacta de un hidrograma original, su facilidad es útil para determinar los principales parámetros; los cuales junto al hidrograma adimensional permiten representar la forma original del hidrograma para la cuenca (Flores, 2020).

Tiempo de retraso.

Nos indica el tiempo que transcurre desde la mitad de la duración total de la lluvia que excede la tormenta, hasta llegar al momento máximo (t_r) en el hidrograma.

$$T_r = 0.60 t_c$$

Fórmula 9. Tiempo de retraso.

Donde:

T_r = Tiempo de retraso (horas) .

t_c = Tiempo de concentración (horas).

Duración en exceso.

Es el lapso durante el cual la lluvia, ya sea efectiva o excedente, continúa hasta alcanzar el momento en que se observa el flujo máximo o el caudal pico.

$$d_e = 2 \sqrt{t_c}$$

Fórmula 10. Duración en exceso.

Donde:

d_e = Duración en exceso (horas).

t_c = Tiempo de concentración (horas).

Tiempo pico.

Es el periodo desde el inicio del flujo directo hasta que se alcanza el máximo caudal.

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_c$$

Fórmula 11. Tiempo pico.

Donde:

tp= Tiempo pico (horas).

de= Duración en exceso (horas).

tc = Tiempo de concentración (horas).

Caudal pico.

Es el caudal máximo observado en el hidrograma de escurrimiento

$$Q_p = 0.208 A_c \frac{P_e}{t_p}$$

Fórmula 12. Caudal pico.

Donde:

Qp = Caudal pico (m³/s).

Ac = Superficie de la cuenca (km²)

P = Precipitación (mm).

tp= Tiempo pico (horas).

Caudal mediante modelación hidrológica en HEC-HMS**Base climatológica.**

Para conocer los datos de las precipitaciones máximas en 24 horas, se optó por levantar la información desde la estación metereológica MA0162 (Chone-U. Católica) perteneciente al INAMHI, desde el año 2013 al 2022, considerando para ello la precipitación máxima registrada en 24 horas para cada año mencionado (Valdivieso *et al.*, 2021).

Modelo hidrográfico.

Según Gómez (2016), una modelación hidrológica es la representación resumida de la realidad, fundamental para transformar la lluvia en escorrentía en una cuenca hídrica, por lo que se generó una modelación semi distribuida mediante el software HEC-HMS considerando una distribución espacial, mediante el método Muskingum Cunge para el tránsito de avenida.

Características Físicas para la Construcción del Modelo.

Para la construcción del modelo hidrológico mediante el Modelo de Elevación Digital (DEM) se consideró el geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM), con una resolución de 1:60 000 del año 2020, y de la página oficial de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (por sus siglas en inglés NASA), con un tamaño de pixeles igual a 10x10.

Caracterización de la cuenca.

Se delimitó la cuenca hídrica del sitio la Carmela del cantón Chone mediante el software HEC-HMS, considerando un umbral de aporte hasta el punto de aforo igual a 0,50 km².

Área de la cuenca.

El área se define por el parteaguas de los niveles topográficos altos que escurre en la cuenca, guardando relación con el caudal que trascurre por ella, empleando el kilómetro cuadrado [km²] como unidad de medida para expresar su tamaño (Lux, 2016).

Perímetro de la cuenca.

Es la longitud de los parteaguas que definen a la cuenca a lo largo de su divisoria hídrica, empleando el kilómetro [km] como unidad de medida para expresar su tamaño (Lux, 2016).

Longitud del cauce.

Se define por la distancia entre la desembocadura de la cuenca hasta el punto más distante, y se emplea el kilómetro [km] como unidad de medida (Lux, 2016).

Desnivel altitudinal.

El desnivel altitudinal está definido por la diferencia entre la cota superior y la cota inferior en la cuenca, empleando el kilómetro [km] como unidad de medida para expresar su tamaño (Lux, 2016).

Pendiente Media.

La pendiente media es una medida que ayuda a determinar la velocidad a la que circula el agua en la cuenca, empleando el metro [m] como unidad de medida, y para su determinación se empleó un archivo vectorial de la cuenca (en formato shape) y un archivo tipo Raster (en formato TIFF) (Lux, 2016).

Tormenta de diseño.

Para generar la tormenta de diseño se consideraron los datos de precipitaciones máxima en 24 horas recopiladas desde la estación meteorológica MA0162 (Chone-U. Católica) perteneciente al INAMHI, desde el año 2013 al 2022, considerando que la duración hipotética de la lluvia será igual a el tiempo de concentración.

Factor de escorrentía en la cuenca.

Para estimar el factor de escorrentía en la cuenca se consideró la cobertura, su desnivel altitudinal, su uso y tipo de suelo, para estimar el agua llovida que escurrirá superficialmente y

fluirá por el cauce; para ello se tomó el Coeficiente de escorrentía (C) de la tabla 11 en la sección de anexos y el Número de Curva (CN) como se describe a continuación (González *et al.*, 2016).

Número de escurrimiento.

Se utilizó el Método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para las abstracciones, y se calculó el Número de Curva de escorrentía (CN), tomando las pérdidas netas menos la evaporación real (González *et al.*, 2016), expresadas en la siguiente fórmula:

$$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN}$$

Fórmula 13. Número de escurrimiento.

Donde:

S = Potencial de máxima retención.

CN = Número de curvas adimensional.

Respuesta lluvia escorrentía.

La respuesta lluvia escorrentía nos indica el caudal generado en la cuenca con relación a las precipitaciones registradas, fragmentando lo llovido de lo transformado en flujo superficial. Para ello se analizó el comportamiento hidrológico mediante el hidrograma de diseño, considerando la lluvia y la escorrentía mediante el software HEC-HMS, ingresando los datos morfométricos y las tomadas de en la zona (Martínez y Coello, 2015).

Intensidad de precipitación.

Para estimar la intensidad de lluvia precipitada se optó por la metodología propuesta por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], considerando el análisis de lluvias intensas para el Ecuador, caracterizándolo en 35 áreas de ambientes hidrológicos

similares, considerando una ecuación de intensidad para cada período de retorno según la duración de la lluvia (INAMHI 1999).

Tránsito de avenida.

Se empleó la ley de Gumbel para determinar la máxima avenida (Sánchez, 2013).

$$F(x) = e^{-e^{-(x-u)/\alpha}}, \quad \alpha = \frac{S_x}{\sigma_y}, \quad u = \bar{x} - \mu_y * \sigma$$

Fórmula 14. Distribución de Gumbel.

Donde:

F(x) = Probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x.

e = Base de los logaritmos neperianos.

\bar{x} = Media aritmética de la muestra.

S_x = Desviación estándar de la muestra.

σ_y, μ_y = Consultar tabla 12 en anexos según el número de datos de la muestra.

Resultados

Caudal de tránsito mediante un video durante una crecida repentina

Se dedujo el caudal de tránsito en el sector la Carmela del cantón Chone mediante un video tomado durante una inundación suscitada en la zona el 07 de marzo del 2023, presentando en la tabla 3 los datos levantados in situ.

Tabla 3

Datos del tránsito en el sector la Carmela durante una crecida repentina.

Sección	Aproximadamente rectangular
Altura (h)	1,65 m
Base (b)	12,48 m
Pendiente (s)	0,005 m/m
n - Manning	0,08

Se visualizó en el video que un objeto flotante recorre 10,5 metros en 3 segundos, y en un tronco se observa una máxima elevación de 35 cm, presentando los resultados hidráulicos del río considerando su velocidad y el caudal de tránsito en la tabla 4.

Tabla 4

Parámetros hidráulicos, velocidades y caudal de tránsito en el sector la Carmela.

Parámetros	Resultados
Área mojada	20,59 m ²
Perímetro mojado	15,75 m

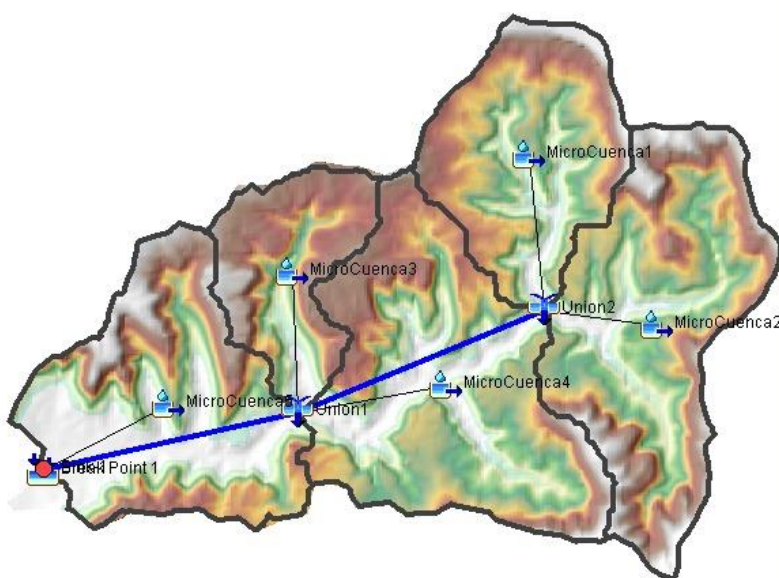
Tirante hidráulico	12,50 m
Radio hidráulico.	1,30 m
Velocidad mediante Manning.	1,06 m/s
Velocidad mediante Bernoulli.	2,07 m/s
Velocidad mediante el Flotador	2,77 m/s
Velocidad Promedio	1,96 m/s
Número de Froude	0,49
Tipo de flujo	Subcritico
Caudal de Diseño	21,73 m ³ /s

Caudales de Diseño mediante una Simulación Hidrológica

Se delimitó la cuenda del sector la Carmela mediante una simulación hidrológica en el software HEC-HMS como se observa en la figura 2.

Figura 2

Sector la Carmela delimitado en HEC-HMS.



Se estimaron los parámetros morfométricos de la cuenca hídrica en el sector la Carmela como se muestra en la tabla 5, y del canal de tránsito como se muestra en la tabla 6.

Tabla 5

Parámetros morfométricos de la cuenca hídrica en el sector la Carmela.

Subcuenca N°	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud (km)	Pendiente media (m/m)
1	17,85	7,65	7,65	47,065
2	26,62	9,30	9,30	47,697
3	11,09	6,77	6,77	15,419
4	28,83	9,52	9,52	30,101
5	23,64	9,16	9,16	1,789

Tabla 6

Parámetros morfométricos del canal de Tránsito.

Canal	Longitud (km)	Pendiente (m/m)
La Carmela	6,84	0,0051

Para convertir la lluvia en escorrentía se consideró el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), determinando un número de curva para cada subcuenca como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7

Número de curva para cada subcuenca en el sector la Carmela.

Subcuenca	Número de Curva (CN)
1	68,26
2	76,75
3	82,56
4	78,11
5	70,92

Se estimó el tiempo de concentración en la cuenca hídrica del sector la Carmela mediante la fórmula de Kirpich estimando un valor de 63 minutos, considerando este valor como la duración hipotética que tendrá la lluvia, por lo que se trabajó en la modelación hidrológica con un dato igual a 60 minutos. Se optó por usar los datos de la estación meteorológica en 24 horas (ver tabla 8) para efectuar un ajuste de distribución Gumbel de valores extremos, considerando tormentas con periodos de retorno de 2 años (ver en anexos el hietograma).

Con los datos de entrada tales como el número de curva, el tiempo de concentración, las precipitaciones máximas en 24 horas y el tránsito de avenida en la cuenca hídrica del sector la Carmela, se efectuó la modelación hidrológica en el software HEC-HMS para un periodo de retorno de 2 años, estimando un caudal de tránsito por el canal de 26,50 m³/seg como se muestra en la tabla 9.

Tabla 8

Precipitación máxima en 24 horas desde el año 2013 al 2022.

Año	Precipitación máxima en 24 horas
2013	149,7
2014	60,1
2015	79,4
2016	131,1
2017	88,8
2018	77,5
2019	51,3
2020	63,4
2021	60,8
2022	121,32

Tabla 9

Caudales máximos para las quebradas según su periodo de retorno.

Periodo de retorno Tr (Años)	Caudal (m³/s)
2	26,5

Caudal de diseño mediante Método Racional

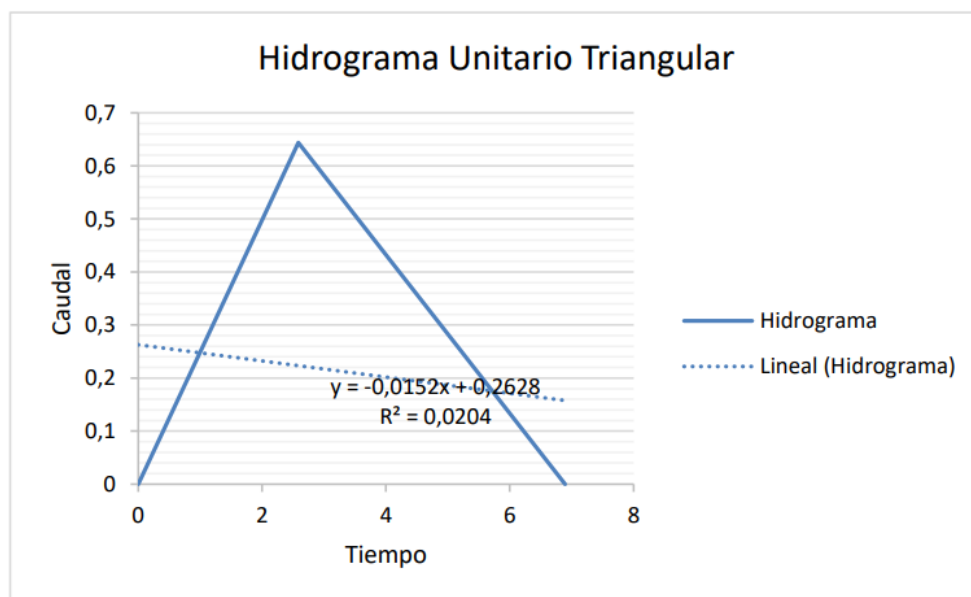
En función a los parámetros de pendiente altas y cobertura; pastos, vegetación ligera y suelos permeable se estimó el coeficiente de escorrentía igual a 0.20, con un área de 17,85 km², y una intensidad de lluvia igual a 26.58 mm, pudiéndose deducir un caudal de 26,38 m³/s.

Caudal para máximas crecidas mediante el método del Hidrograma Unitario Triangular.

Mediante el método del hidrograma unitario se determinaron las variables tales como: tiempo de retraso (tr) de 1.18 horas, duración en exceso (de) igual a 2,80 horas, y un tiempo pico (tp) de 2.58 horas, para un tiempo base de 6,89 horas.

Figura 3

Hidrograma Unitario Triangular.



Una vez generado el hidrograma unitario triangular se obtuvo un caudal pico de 0,64 m³/s/mm, y un caudal pico final de 26,28 m³/s.

Comparación de los Caudales de Diseño

Tabla 10

Comparación de caudales de tránsito durante una crecida repentina.

Método	Caudal (m³/seg)
Video durante una crecida repentina (Manning)	21,73
Simulación hidrológica (Tr = 2 años)	26,50
Método Racional	26,38
Hidrograma unitario Triangular	26,28

Al comparar los resultados se observa que se encuentran en un mismo orden de magnitud, pero el método de videos durante una crecida repentina en la zona subestima el caudal en un 17,3% menos en relación a las demás metodologías (una diferencia de 4.55 m³/seg).

Discusión

En relación a la recolección de información en campo se tomó un video durante un evento de crecida repentina suscitado en el sector la Carmela el 07 de marzo del 2023, donde se percibieron deslaves que provocaron pérdidas humanas y materiales de gran magnitud, alcanzando en el río Mosquito con una sección aproximadamente rectangular una altura de 1,65 m y un ancho de 12,5 m, determinándose posteriormente una pendiente de 0,005 m/m con un coeficiente de fricción (n - Manning) igual a 0,08, visualizándose en el video que un objeto flotante recorrió 10,5 metros en 3 segundos, y en un tronco una máxima elevación de 0,35 m.

Los criterios de recolección de información a partir de videos durante inundaciones repentinas concuerdan con los señalados por Lumbroso y Gaume (2012), quienes señalan que en la estimación indirecta de las descargas de inundaciones extremas mediante su apoyo en videos para recopilar datos del caudal de tránsito bajo una posterior validación de dimensiones en campo, ayudan a reducir la incertidumbre de cálculo.

A partir de la información recopilada se calcularon los parámetros hidráulicos del canal en el sector la Carmela, destacándose un área mojada de 20,59 m², un perímetro mojado de 15,78 m y un radio hidráulico de 1,30 m, con los que se determinó una velocidad de 2,07 m/s mediante el método Bernoulli y de 2,77 m/s mediante el método del flotador. A partir de estos datos se estimó una velocidad promedio igual a 1,96 m/s, lo cual señala un tipo de flujo subcrítico al poseer un número de Froude igual a 0,49; finalmente se dedujo el caudal de tránsito mediante el método de Manning consiguiendo un valor de 21,73 m³/s. Los resultados obtenidos concuerdan en orden de magnitud con la investigación efectuada por Cando (2016), quien consiguió un caudal máximo de 40,54 m³/s durante el mes de marzo para el Río Mosquito.

Se generaron tres metodologías adicionales para estimar el caudal en el sector la Carmela, destacándose que con una modelación hidrológica en software HEC-HMS se obtuvo un caudal de $26,50 \text{ m}^3/\text{s}$, mediante con el método racional un caudal de $26,38 \text{ m}^3/\text{s}$, y mediante el hidrograma unitario triangular un caudal de $26,28 \text{ m}^3/\text{s}$; al compararlo con el método de Manning este subestima el caudal en un 17,3% menos en promedio en relación a las demás metodologías (una diferencia de $4.55 \text{ m}^3/\text{seg}$). Los resultados estimados concuerdan en orden de magnitud con la simulación hidrológica generada en la cuenca del Río Mosquito por Gutiérrez *et al.*, (2008), quienes consiguieron un valor de $32 \text{ m}^3/\text{s}$ para periodo de retorno de 2 años, considerado como de riego moderado para la zona según la investigación efectuada por Correa (2020).

Conclusiones

La recolección de información en campo mostró una sección aproximadamente rectangular con una altura de 1,65 m y un ancho de 12,5 m durante un evento de crecida repentina, determinándose una pendiente de 0,005 m/m con un coeficiente de fricción (n - Manning) igual a 0,08, visualizándose que un objeto flotante recorrió 10,5 metros en 3 segundos, y en un tronco se vio una elevación de 0,35 m.

Se estimó una velocidad de 2,07 m/s mediante el método Bernoulli y de 2,77 m/s mediante el método del flotador, en promedio 1,96 m/s, señalando un tipo de flujo subcrítico al poseer un número de Froude igual a 0,49, con lo que se dedujo un caudal de tránsito mediante el método de Manning igual a $21,73 \text{ m}^3/\text{s}$.

Al comparar las metodologías para estimar el caudal se observa que se encuentran en un mismo orden de magnitud, pero el método de videos durante una crecida repentina en la zona subestima el caudal un 17,3% menos en relación a las metodologías de la simulación hidrológica en HEC-HMS, el método Racional y el Hidrograma Unitario Triangular.

Bibliografía

- Arreguín, F., López, M., y Marengo, H. (septiembre de 2016). *Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática*. Obtenido de Tecnologías y ciencias del agua, revista Scielo: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222016000500005&script=sci_arttext
- Cajas, M. (2016). *Actualización de los estudios de riego y drenaje del proyecto propósito múltiple Chone*. Obtenido de Escuela Superior Politécnica del Ecuador: <https://maemanabi.files.wordpress.com/2016/11/componente-fisico.pdf>
- Chow, Ven Te. (1994a). *Hidráulica de canales abiertos, Capítulo 2. Canales abiertos y sus propiedades (pág. 21-23)*. Obtenido de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/2409>
- Chow, Ven Te. (1994b). *Hidráulica de canales abiertos, Capítulo 5. Desarrollo del flujo uniforme y sus ecuaciones (pág. 108-111)*. Obtenido de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/2409>
- Coral, I., y Stefan, B. (2016). *Ocurrencia y Gestión de inundaciones en América Latina y el Caribe - Factores claves y experiencias adquiridas*. Obtenido de Banco Internacional de Desarrollo: <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/Ocurrencia-y-gesti%C3%B3n-de-inundaciones-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-Factores-claves-y-experiencia-adquirida.pdf>
- Correa, J., Vines, F., y Zambrano, E. (2020). *Zonificación de riesgo por inundación en las subcuencas Río Grande, Mosquito, Garrapata aportantes al Río Chone*. Obtenido de

Revista de Ciencias Agropecuarias:

<https://publicacionescd.ulead.edu.ec/index.php/allpa/article/view/61>

Domingos, D., Martínez, Y., y Jiménez, G. (2014). *Estimación de caudales máximos en una cuenca urbana de Luanda*. Obtenido de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, revista Scielo: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382014000300001&script=sci_arttext

EL COMERCIO. (8 de marzo de 2023). *Chone declarado en emergencia por lluvias; hay 80 000 personas afectados*. Obtenido de Actualidad: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/coe-cantonal-emergencia-chone-personas-afectados.html>

Fischer, G. (2021). *El aumento de las inundaciones generado por el cambio climático afectará nuestros cultivos*. Obtenido de Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, Revista Scielo: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0304-28472021000309619&script=sci_arttext

Flores, V. (2020). *Generación de máximas avenidas en la sub cuenca Torococha empleando métodos hidrológicos, para diseño del puente Torococha, Juliaca, Puno, 2020*". Obtenido de Universidad César Vallejo, Perú: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/57926>

García, M., Montaña, B., y Melgarejo, J. (2020). *La recuperación de costes y la financiación de las medidas de mitigación de daños de inundaciones*. Obtenido de Universidad de Alicante, Valencia: <http://hdl.handle.net/10045/109071>

- Giler, A., Donoso, S., Arteaga, R., y Zaldumbide, D. (2020). *Manejo sostenible de inundaciones, cuencas y riberas en la provincia de Manabí*. Obtenido de La Técnica Revista de las Agrociencias: http://dx.doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i23.1442
- Gómez, Á. (2016). *Herramienta de Modelación y Monitoreo para la Hidrología de Alta Montaña Colombiana*. Obtenido de Modelación Hidrológica, Pág.40: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57348>
- Gómez, G., Rossel, F., y Clairet, S. (1996). *Regionalización de la pluviometría anual del Ecuador para el estudio del impacto del ENSO en los regímenes pluviométricos*. Obtenido de Serie Inundaciones y Sequías: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-06/010006845.pdf
- Gonzáles, A., Alvarez, P., Gonzáles, M., y Aguirre, Z. (2016). *Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, Ecuador*. Obtenido de CEDAMAZ: <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/61>
- Groch, D., y Cogliati, M. (2022). *Medidas de mitigación contra inundaciones en la isla urbanizada "La Herradura", Neuquén, Argentina*. Obtenido de Revista de geografía Norte Grande, Scielo: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022022000300221>
- Gutiérrez, C., Góngora, E., Melo, P., y Vaca, A. (2008). *Estudio hidrológico de inundaciones en la cuenca alta del Río Chone (Subcuencas: Garrapata, Mosquito y Grande)*. Obtenido de: <https://issuu.com/inamhi/docs/chone>
- Hidalgo, J., y Boelens, R. (2018). *Inundaciones políticamente construidas. El megaproyecto hídrico Chone en Ecuador*. Obtenido de Cuadernos de Geografía: <https://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/69291/6817016.pdf?sequence=1>

- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (1999). *Estudio de Lluvia Intensidad*. Obtenido de Intensidad de lluvia: <https://dokumen.tips/documents/estudio-lluvias-intensas-inamhi.html?page=1>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2023). *Publicaciones meteorológica*. Obtenido de Biblioteca INAMHI: <https://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/>
- López, J. (noviembre de 2016). *Evaluación de metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales en la zona del Piedemonte del Departamento del Casanare*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59134>
- Lumbroso, Y., y Gaume, E. (2012). *Journal of Hydrology*. Obtenido de *Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges*. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>
- Lux, B. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. Obtenido de Universidad de San Carlos, Guatemala: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58750302/Conceptos_basicos_de_Morfometria_de_Cuencas_Hidrograficas_1-libre.pdf?1553987893=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DConceptos_basicos_de_Morfometria_de_Cuen.pdf&Expires=1695918003&Signature=Es
- MAPACARTA. (2023). *Localización del sector La Carmela del cantón Chone*. Obtenido de: <https://mapcarta.com/es/N4152220012>

Martínez, E., y Coello, C. (2015). *Análisis hidrológico y respuesta lluvia-escorrentía de cuatro microcuencas de alta montaña del sur del Ecaudor*. Obtenido de Universidad de Cuenca, Ecuador: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23104>

Mauriño, M. (2013). *Sistemas de mitigación de inundaciones en la provincia de Buenos Aires*. Obtenido de Universidad Nacional de la Plata, Argentina: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/38210>

Reyes, J. (2023). *Eficiencia del recurso hídrico en el riego de pasto para la adaptación al cambio climático*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Chone: *(Tesina de titulación no publicada)*.

Sánchez, J. (2013). *Medida de caudales*. Obtenido de Universidad de Salamanca, España: <https://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>

Valdivieso, C., Cedeño, G., y Guanoluisa, A. (2021). *Análisis Estadístico de los datos climáticos históricos de la SPAM MFL*. Obtenido de Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Ecuador: <https://www.manabi.gob.ec/wp-content/uploads/2021/11/Analisis-Estadistico-de-los-datos-climaticos-historicos-de-la-SPAM-MFL.pdf>

Anexos

Tabla 11

Grupos hidrológicos del suelo (SCS).

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h	Arenosa; Arenosa-limosa; Franca
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa; Franco-arcillosa-limosa; Arcillo-arenosa
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcillosa

Tabla 12

Tabla para considerar variables σ_y y μ_y según el número de datos.

Número de datos	μ_y	σ_y
10	0,4952	0,9496
15	0,5128	1,0206
20	0,5236	1,0628
25	0,5309	1,0914
30	0,5362	1,1124
35	0,5403	1,1285
40	0,5436	1,1413
45	0,5463	1,1518
50	0,5485	1,1607
55	0,5504	1,1682
60	0,5521	1,1747
65	0,5535	1,1803
70	0,5548	1,1854
75	0,5559	1,1898
80	0,5569	1,1938
85	0,5578	1,1974
90	0,5586	1,2007
95	0,5593	1,2037
100	0,5600	1,2065

Figura 4

Toma de las características del canal en el sector la Carmela.



Figura 5

Toma de las características del canal en el sector la Carmela.



Figura 6

Video durante inundación repentina en el sector la Carmela.



Figura 7

Hietograma para un periodo de retorno de 2 años en el sector la Carmela.

