

Manual técnico de hidrología e hidráulica

Hidro.uy

26 de julio de 2026

Índice

1. Tiempo de concentración	3
1.1. Trayectoria urbana IMM–Desbordes	3
1.2. Kirpich	6
1.3. Témez	7
1.4. FAA	8
1.5. Giandotti	8
1.6. SCS Lag	9
1.7. NRCS por velocidades	10
1.8. NRCS por cobertura (coeficiente k)	12
2. Escorrentía y pérdidas	14
2.1. Método racional	14
2.2. Coeficiente de escorrentía C	15
2.3. NRCS Curve Number	15
2.4. Número de curva CN	16
3. Tormentas de diseño	18
3.1. Qué representa una tormenta de diseño	18
3.2. Curvas IDF de Uruguay	19
3.3. Montevideo 6 h	22
3.4. IMFIA–DINAGUA	24
3.5. Racional: intensidad constante	25
3.6. Bloques alternantes	26
3.7. Chicago	26
3.8. SCS Tipo II (24 h)	27
3.9. SCS Tipo I (24 h)	28
3.10. Huff, segundo cuartil	29

3.11. Bimodal (doble pico)	30
4. Parámetros de diseño y discretización	31
4.1. Período de retorno	31
4.2. Intervalo temporal Δt	31
4.3. Factor X del hidrograma triangular	32
5. Fundamentos hidráulicos y flujo en canales	35
5.1. Ecuación de Manning	35
5.2. Número de Froude y tirante crítico	36
5.3. Energía específica	37
5.4. Cantidad de movimiento y resalto hidráulico	37
5.5. Flujo gradualmente variado	38
5.6. Darcy–Weisbach, Reynolds y Colebrook	39
6. Alcantarillas, cunetas y captaciones	41
6.1. Alcantarillas: control de entrada y salida	41
6.2. Cunetas y flujo en calzada	42
6.3. Captaciones e interceptación	42
7. Detención, enrutamiento y bombeo	44
7.1. Curva cota–almacenamiento	44
7.2. Orificios y vertederos	44
7.3. Enrutamiento por Puls modificado	45
7.4. Muskingum y Muskingum–Cunge	46
7.5. Estaciones de bombeo	47

1. Tiempo de concentración

Métodos disponibles para estimar la respuesta temporal de una cuenca. Las ecuaciones empíricas no son intercambiables: deben seleccionarse según escala, uso del suelo, trayectoria hidráulica y origen de la calibración.

1.1. Trayectoria urbana IMM–Desbordes

El procedimiento disponible en Hidro estima el tiempo de entrada de una microcuenca urbana y le suma el tránsito por cunetas, canales o conductos hasta el punto de cierre. Para aplicarlo correctamente es necesario distinguir el modelo francés de Michel Desbordes, la síntesis posterior de DINASA y el criterio adoptado por Montevideo.

El problema estudiado por Michel Desbordes

El artículo de 1975 analiza la transformación lluvia–caudal en cuencas urbanas y representa el almacenamiento de la cuenca y su red mediante un reservorio lineal, $S(t) = KQ(t)$. En ese modelo, K expresa el desfase entre los centros de gravedad de la lluvia neta y del caudal. Por tanto, K es un parámetro temporal del modelo de transformación y no debe identificarse automáticamente con el tiempo de entrada ni con el tiempo de concentración total empleado en un proyecto de drenaje.

$$K = 5,07 A^{0,18} p^{-0,36} \left(1 + \frac{IMP}{100}\right)^{-1,9} T_E^{0,21} L^{0,15} H_{PE}^{-0,07} \quad (1)$$

Ecuación (20) del artículo. K se obtiene en minutos; A está en hectáreas, p e IMP en porcentaje, TE en minutos, L en metros y HPE en milímetros.

Una relación original de tiempo de concentración

En una sección anterior, Desbordes propone además una relación para el tiempo de concentración de cuencas homogéneas. Esta ecuación depende de la pendiente, el área y el caudal pico, y su dominio se limita a áreas menores que 200 ha. No es la misma expresión A–P–C que posteriormente reproducen DINASA y el Plan Director de Montevideo.

$$t_c = 0,65 I^{-0,41} A^{0,51} Q_p^{-0,29} \quad (2)$$

Ecuación (10) del artículo: t_c en minutos, I en m/m, A en hectáreas y Q_p en m^3/s .

Síntesis reproducida por DINASA

DINASA define el tiempo de concentración urbano como la suma de los tiempos de viaje sobre la trayectoria hidráulicamente más lenta. En ese contexto reproduce una expresión empírica A–P–C con un tiempo inicial T_0 . DINASA la presenta para estimar el tránsito no concentrado de subcuencas urbanas; no afirma que sea una reducción algebraica del reservorio lineal publicado por Desbordes.

$$T_c = T_0 + 6,625 A^{0,30} P^{-0,38} C^{-0,45} \quad (3)$$

En la presentación de DINASA, A se expresa en hectáreas, P en porcentaje, C es adimensional y Tc se obtiene en minutos.

Criterio del Plan Director de Montevideo 2019

Para sus microcuencas de proyecto, el Plan Director denomina tiempo de entrada al recorrido desde el punto más alejado hasta la cuneta. Evalúa la expresión empírica, fija 10 min como valor mínimo y adopta el mayor de ambos resultados. En consecuencia, 10 min no es un límite superior: si la ecuación produce 18 min, el tiempo de entrada adoptado es 18 min.

$$t_e = \text{máx} (10, 6,625 A^{0,30} P^{-0,38} C^{-0,45}) \quad (4)$$

Criterio de las secciones 4.2.3 y 5.2.3 del Tomo XXIII: A en hectáreas, P en porcentaje, C adimensional y te en minutos.

Del tiempo de entrada al tiempo de concentración

Una vez estimado el tiempo de entrada, cada recorrido posterior se representa por su longitud y velocidad media. El tiempo de concentración se obtiene siguiendo una única trayectoria continua hasta el punto de cierre, no sumando recorridos alternativos. Manning puede utilizarse en tramos aproximadamente uniformes; remansos, controles, almacenamiento o flujo en carga requieren una evaluación hidráulica más completa.

$$T_c = t_e + \sum_i \frac{L_i}{V_i} \quad (5)$$

L en m y V en m/s; cada cociente debe convertirse a la unidad temporal adoptada antes de sumarse.

Variables

- T_c Tiempo de concentración (min).
- t_e Tiempo de entrada adoptado (min).
- T_0 Tiempo mínimo de entrada del criterio local (min).
- A Área de la cuenca (ha).
- P Pendiente media (%).
- C Coeficiente de escorrentía racional (—).
- L_i Longitud del tramo hidráulico i (m).
- V_i Velocidad media del tramo hidráulico i (m/s).

Dominios informados en el artículo original de 1975

Formulación	Variable	Rango documentado	Unidad
Tiempo de concentración, ec. (10)	Área A	<200	ha
Tiempo de concentración, ec. (10)	Pendiente I	0,2 – 5	%
Tiempo de concentración, ec. (10)	Coeficiente C	0,2 – 1	—
Reservorio lineal K, ec. (20)	Área A	0,4 – 5 000	ha
Reservorio lineal K, ec. (20)	Impermeabilización IMP	2 – 100	%
Reservorio lineal K, ec. (20)	Longitud L	110 – 17 800	m
Reservorio lineal K, ec. (20)	Pendiente media p	0,4 – 5	%
Reservorio lineal K, ec. (20)	Duración de lluvia neta TE	5 – 180	min
Reservorio lineal K, ec. (20)	Lámina de lluvia neta HPE	5 – 240	mm

Estos rangos describen dos formulaciones diferentes y la muestra francesa utilizada por Desbordes. No constituyen límites normativos para Uruguay ni pueden trasladarse automáticamente a la expresión reducida IMM–DINASA.

Procedimiento

1. Delimitar la trayectoria hidráulicamente más lenta hasta el punto de cierre.
2. Estimar el tiempo de entrada con el criterio local y conservar A, P, C, el valor de la ecuación y el mínimo adoptado.
3. Dividir el recorrido posterior en tramos hidráulicamente homogéneos.
4. Calcular o justificar la velocidad de cada tramo y sumar L/V.
5. Revisar que ninguna transición, remanso, control o almacenamiento invalide la aproximación uniforme.

Aplicabilidad

La opción de Hidro representa la aplicación local documentada por Montevideo: un tiempo de entrada para una microcuenca urbana seguido por el tránsito hidráulico hasta el punto de cierre.

DINASA ubica esta estimación en el tramo de flujo no concentrado de pequeñas subcuencas de cabecera y recuerda que las ecuaciones empíricas deben utilizarse bajo condiciones semejantes a aquellas en que fueron determinadas.

Las secciones consultadas del Plan Director no establecen un área máxima explícita para la expresión A–P–C. Por ello, una cuenca extensa o muy heterogénea requiere subdivisión, trazado de recorridos y justificación profesional; no corresponde adoptar 200 ha o 5 000 ha como límite automático de la fórmula local.

Limitaciones y cautelas

Los dominios de 200 ha y 5 000 ha pertenecen a ecuaciones diferentes del artículo francés. Ninguno de ellos valida por sí mismo la expresión reducida utilizada por Montevideo.

La referencia de aproximadamente 0,25 ha en DINASA describe una pequeña superficie de cabecera para la que pueden adoptarse tiempos constantes; no es un máximo general de aplicación de Desbordes.

El tiempo de entrada no sustituye los recorridos posteriores por cuneta, canal o conducto. Omitirlos reduce artificialmente el tiempo de concentración.

La velocidad de Manning supone flujo aproximadamente uniforme y geometría y rugosidad representativas. Los tramos con remanso, control, almacenamiento o flujo parcial deben modelarse con el procedimiento hidráulico correspondiente.

Referencias

- Desbordes, M. (1975). Une étude générale de l'assainissement pluvial urbain. La Houille Blanche, n.º 1, desbordes-1975-etude-generale-assainissement-pluvial-urbain.pdf, páginas PDF 4–6, páginas impresas 40–42. <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1975/01/lhb1975002.pdf>
- Manual DINASA, página PDF 49.
- Intendencia de Montevideo (2019). Plan Director de Saneamiento y Drenaje Urbano, Tomo XXIII: Ajustes de intervenciones de primera etapa, imm-plan-director-tomo-xxiii-ajustes-intervenciones-2019.pdf, sección 4.2.3, página PDF 37, página impresa 15; sección 5.2.3, página PDF 108, página impresa 86. https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/tomoxxiiajuste_sdeintervencionesprimeraetapa29112019.pdf

1.2. Kirpich

Ecuación empírica para cuencas rurales pequeñas con cauces definidos y pendientes relativamente altas.

$$T_c = 0,0195 L^{0,77} S^{-0,385} \quad (6)$$

Forma SI utilizada por Hidro; el resultado se obtiene en minutos.

Variables

T_c Tiempo de concentración (min).

L Longitud del cauce principal (m).

S Pendiente del cauce (m/m).

Aplicabilidad

La calibración original citada por NRCS utilizó siete cuencas rurales de Tennessee.

Las áreas de calibración estuvieron entre 1.25 y 112 acres, aproximadamente 0.5–45 ha.

Limitaciones y cautelas

El uso fuera de cuencas pequeñas, rurales y con cauce definido es una extrapolación.

No representa explícitamente almacenamiento, urbanización ni cambios de cobertura.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, página PDF 6, página interna 5.
- USDA NRCS (2010). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 15: Time of Concentration. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720461053/Chapter%2015%20-%20Time%20of%20Concentration.pdf>

1.3. Témez

Ecuación utilizada por la Norma española 5.2-IC para estimar el tiempo de concentración de cuencas principales.

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (7)$$

Con L en km y S en m/m, Hidro obtiene T_c en horas.

Variables

T_c Tiempo de concentración (h).

L Longitud del cauce principal (km).

S Pendiente media (m/m).

Aplicabilidad

La Norma 5.2-IC aplica esta formulación a cuencas principales y exige tantear distintos cauces o recorridos para seleccionar el que produce el mayor T_c .

Limitaciones y cautelas

Si $T_c \leq 0,25$ h y el recorrido en flujo difuso es apreciable respecto al recorrido total, la Norma 5.2-IC indica utilizar el procedimiento específico para cuencas secundarias.

Es un criterio español de drenaje carretero; su uso en Uruguay requiere justificar su compatibilidad con la normativa y las condiciones locales.

Referencias

- Ministerio de Fomento (España). Norma 5.2-IC de la Instrucción de Carreteras: Drenaje superficial, apartado 2.2.2.5, norma-5.2-IC-drenaje-superficial.pdf, página PDF 25, página impresa 12. https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/carreteras/normativa_tecnica/07_drenaje/52ic_fom2982016_err_fom1852017_res180326_consolidado.pdf

1.4. FAA

Estimación de tiempo de entrada desarrollada para superficies aeroportuarias y drenaje de áreas pequeñas.

$$T_c = 1,8 (1,1 - C) \frac{L^{0,5}}{S^{0,333}} \quad (8)$$

La forma implementada usa L en pies, S en porcentaje y entrega T_c en minutos.

Variables

T_c Tiempo de concentración (min).

C Coeficiente de escorrentía (—).

L Longitud de flujo (ft).

S Pendiente (%).

Aplicabilidad

Áreas pequeñas con respuesta rápida y superficies comparables a las de drenaje aeroportuario.

Limitaciones y cautelas

La ecuación depende fuertemente de C y no debe trasladarse sin justificación a grandes cuencas naturales.

Uso en la plataforma

Hidro convierte la longitud ingresada en metros a pies antes de evaluar la ecuación.

Referencias

- Federal Aviation Administration (2013). AC 150/5320-5D, Airport Drainage Design. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/150_5320_5d.pdf

1.5. Giandotti

Relación geomorfológica basada en área, longitud del cauce y desnivel de la cuenca.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}} \quad (9)$$

Con A en km^2 , L en km y H en m , el resultado es horas.

Variables

A Área de la cuenca (km^2).

L Longitud del cauce principal (km).

H Desnivel representativo (m).

Aplicabilidad

Cuencas naturales donde área, longitud y desnivel representan adecuadamente la morfología.

Limitaciones y cautelas

La literatura presenta distintas definiciones de H ; el usuario debe documentar la adoptada.

No incorpora de forma explícita cobertura, rugosidad ni almacenamiento.

Uso en la plataforma

Hidro estima H como longitud por pendiente media cuando no existe un desnivel independiente.

Referencias

- DINAGUA (2011). Manual de diseño y construcción de pequeñas presas, Vol. 1: Diseño hidrológico-hidráulico. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manua1-diseno-construccion-pequenas-presas>

1.6. SCS Lag

Método de retardo de cuenca de Mockus, relacionado con T_c mediante $\text{Lag} = 0.6 T_c$.

$$T_c = \frac{L^{0,8}(S_r + 1)^{0,7}}{1140 Y^{0,5}}, \quad S_r = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (10)$$

L en pies, Y en porcentaje y S_r en pulgadas; T_c se obtiene en horas.

Variables

L Longitud de la trayectoria de flujo (ft).

Y Pendiente media de la cuenca (%).

S_r Retención potencial (in).

CN Número de curva (—).

Aplicabilidad

NRCS describe una calibración amplia, desde cuencas forestadas hasta superficies pavimentadas.

Limitaciones y cautelas

La relación $Lag = 0.6 T_c$ supone condiciones medias y distribución aproximadamente uniforme de escurrimiento.

CN debe representar de manera consistente suelo, cobertura y humedad antecedente.

Referencias

- USDA NRCS (2010). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 15: Time of Concentration. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720461053/Chapter%2015%20-%20Time%20of%20Concentration.pdf>
- USDA SCS (1986). Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-04/20210107-Roy-Blunt-East-Locust-Creek-Reservoir-FSEIS-Appendix_D.pdf

1.7. NRCS por velocidades

Suma los tiempos de viaje de una única trayectoria hidráulica, distinguiendo flujo en lámina (sheet flow), flujo concentrado superficial y flujo en canal.

Trayectoria y transición entre regímenes

El tiempo de concentración es la suma de los tiempos de viaje desde el punto hidráulicamente más distante hasta la salida. La trayectoria puede cambiar de régimen, pero los tramos deben ser consecutivos: primero flujo en lámina cerca de la divisoria, luego flujo concentrado superficial y, cuando existe una sección definida, flujo en canal.

Flujo en lámina (sheet flow)

Es un escurrimiento somero sobre una superficie aproximadamente plana, cerca de la cabecera. NRCS usa la lluvia de 2 años y 24 horas y supone flujo uniforme, aporte de lluvia constante y profundidad aproximada no mayor que 0,1 ft. La longitud admisible no es un límite fijo de 100 m: debe estimarse con el criterio de McCuen-Spiess.

$$T_t = 0,007 \frac{(nL)^{0,8}}{P_2^{0,5} S^{0,4}}, \quad L_{\text{máx}} = \frac{100\sqrt{S}}{n} \quad (11)$$

Ecuaciones originales estadounidenses: T_t en h, L y $L_{\text{máx}}$ en ft, P_2 en in, S en ft/ft y n de flujo en lámina.

Flujo concentrado superficial

Comienza cuando el flujo deja de distribuirse uniformemente y se concentra en surcos, pequeñas vaguadas o depresiones, sin una sección de canal bien definida. NRCS indica profundidades típicas de 0,1 a 0,5 ft y calcula la velocidad a partir de la pendiente y del tipo de superficie.

$$V = k\sqrt{S}, \quad T_t = \frac{L}{V} \quad (12)$$

En Hidro k se expresa en m/s, S en m/m, L en m y T_t se convierte a horas.

Flujo en canal

Se adopta cuando existe una sección identificable en cartografía, imagen o levantamiento. La velocidad puede obtenerse con Manning o con un perfil de superficie libre; NRCS indica usar normalmente la condición de cauce lleno.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}, \quad T_t = \frac{L}{V} \quad (13)$$

Forma SI de Manning: V en m/s, R y L en m, S en m/m.

$$T_c = \sum_i T_{t,i} = \sum_i \frac{L_i}{V_i} \quad (14)$$

Variables

L_i Longitud del tramo i (m).

V_i Velocidad media del tramo i (m/s).

Coefficientes NRCS para flujo concentrado superficial

Superficie	k (m/s)
Pavimento o pequeñas cárcavas de cabecera	6,196
Vías de agua empastadas	4,918
Casi desnudo o sin laboreo	3,038
Cultivo en hileras rectas	2,671
Pastura de pasto corto	2,122
Labranza mínima o monte	1,534
Bosque con hojarasca densa o heno	0,767

Conversión a SI de la tabla 15-3 de NRCS; V es k por la raíz cuadrada de S.

Procedimiento

1. Dividir la trayectoria hidráulicamente más lenta en tramos homogéneos.
2. Asignar a cada tramo su tipo de flujo, pendiente y rugosidad o geometría.
3. Calcular cada tiempo de viaje y sumarlos sin mezclar trayectorias alternativas.

Aplicabilidad

NRCS lo recomienda especialmente para cuencas en urbanización o cuando se evalúan cambios en la trayectoria hidráulica.

El flujo en lámina corresponde a la cabecera antes de que aparezcan surcos; el concentrado superficial a vaguadas sin sección definida; el canal a un cauce cuya sección y radio hidráulico pueden establecerse.

Limitaciones y cautelas

La trayectoria hidráulicamente más distante se define por tiempo, no necesariamente por longitud.

La clasificación incorrecta del régimen de flujo puede dominar el resultado.

Uso en la plataforma

Hidro calcula para cada tramo su tiempo en horas y valida el flujo en lámina con el límite dinámico de McCuen–Spiess, dependiente de n y S .

Las configuraciones anteriores con las categorías históricas *sin pavimentar* o *con pasto* conservan sus coeficientes; las nuevas categorías muestran la tabla NRCS completa.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, páginas PDF 2–3, páginas internas 1–2.
- USDA NRCS (2010). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 15: Time of Concentration, nrcs-neh-630-chapter-15-time-of-concentration-2010.pdf, páginas PDF 12–13, páginas internas 15-6–15-7. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720461053/Chapter%2015%20-%20Time%20of%20Concentration.pdf>
- USDA NRCS (2010). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 15: Time of Concentration, nrcs-neh-630-chapter-15-time-of-concentration-2010.pdf, páginas PDF 13–14, páginas internas 15-7–15-8. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720461053/Chapter%2015%20-%20Time%20of%20Concentration.pdf>

1.8. NRCS por cobertura (coeficiente k)

Estimación por tramos que ajusta el tiempo según longitud, pendiente y cobertura del suelo.

$$T_c = 0,91134 \sum_i \frac{k_i L_i}{\sqrt{S_i}} \quad (15)$$

L en km, S en porcentaje y T_c en horas.

Variables

k_i Coeficiente de cobertura del tramo (—).

L_i Longitud del tramo (km).

S_i Pendiente del tramo (%).

Aplicabilidad

El Curso HHA indica que el método fue desarrollado con información de cuencas experimentales menores a 8 km² y que resulta adecuado cuando predomina el flujo no concentrado.

Limitaciones y cautelas

La cobertura debe discretizarse por tramos y no promediarse sin conservar la trayectoria hidráulica.

Aplicarlo a cuencas mayores que las utilizadas en su desarrollo constituye una extrapolación que debe justificarse.

Uso en la plataforma

Hidro incluye coeficientes para bosque, pasturas, cultivos, suelo desnudo, vías empastadas e impermeable.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, página PDF 5, página interna 4.
- USDA NRCS (2010). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 15: Time of Concentration. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720461053/Chapter%2015%20-%20Time%20of%20Concentration.pdf>

2. Escorrentía y pérdidas

Conversión de la lluvia total en lluvia efectiva y caudal de diseño.

2.1. Método racional

Estima el caudal pico suponiendo intensidad uniforme durante un tiempo igual a T_c .

$$Q_p = 0,00278 C i A \quad (16)$$

Q_p en m^3/s , i en mm/h y A en ha .

Variables

C Coeficiente de escorrentía (—).

i Intensidad para duración T_c y período de retorno elegido (mm/h).

A Área tributaria (ha).

Aplicabilidad

Para drenaje urbano en Uruguay, DINASA indica su aplicación en cuencas menores de 200 ha y sin almacenamiento o infiltración apreciables.

Como referencia vial estadounidense, HDS-2 limita el área a 80 ha ; este umbral FHWA no sustituye el criterio local de DINASA.

Limitaciones y cautelas

Supone que toda la cuenca contribuye simultáneamente al pico y que la intensidad es espacialmente uniforme.

El error aumenta al crecer el área y el almacenamiento dentro de la cuenca.

HHA recomienda especialmente $T_c \leq 20$ min, desaconseja $T_c > 1$ h y propone comparar Racional con NRCS en el intervalo intermedio.

Uso en la plataforma

Para hidrogramas, Hidro distribuye la lluvia efectiva como C por cada incremento de precipitación.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, página PDF 8, página interna 7.
- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, página PDF 9, página interna 8.
- Manual DINASA, página PDF 121.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 4, hif24006.pdf, página PDF 56, página impresa 24.

- FHWA (2024). Highway Hydrology, Hydraulic Design Series No. 2, 3rd edition. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif24007.pdf>
- Federal Aviation Administration (2013). AC 150/5320-5D, Airport Drainage Design. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/150_5320_5d.pdf

2.2. Coeficiente de escorrentía C

Representa de forma agregada infiltración, almacenamiento superficial, cobertura y pendiente.

$$C_{comp} = \frac{\sum_i C_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (17)$$

Aplicabilidad

Debe elegirse según cobertura, pendiente, suelo y condición de diseño.

Limitaciones y cautelas

No es una constante universal del terreno. Cualquier ajuste por frecuencia requiere una norma o criterio de proyecto explícito.

HEC-22, 4th ed., describe factores de frecuencia usados por algunas agencias, pero declara que FHWA no respalda ese ajuste.

Una media simple es incorrecta si las coberturas tienen áreas diferentes.

Uso en la plataforma

Hidro muestra y almacena C con dos decimales y admite $0 < C \leq 1$.

El factor de frecuencia legado es opcional, está desactivado por defecto y no debe atribuirse como recomendación de FHWA.

Referencias

- Manual DINASA, página PDF 121.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 4, hif24006.pdf, página PDF 56, página impresa 24.
- Federal Aviation Administration (2013). AC 150/5320-5D, Airport Drainage Design. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/150_5320_5d.pdf

2.3. NRCS Curve Number

Calcula escorrentía directa a partir de precipitación, retención potencial y abstracción inicial.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, \quad P > I_a; \quad S = \frac{25400}{CN} - 254; \quad I_a = 0,2S \quad (18)$$

P , Q , I_a y S se expresan en milímetros.

Variables

P Precipitación acumulada (mm).

Q Escorrentía directa acumulada (mm).

CN Número de curva (—).

Aplicabilidad

Eventos de lluvia en cuencas pequeñas urbanas o agrícolas representadas por cobertura y grupo hidrológico.

Limitaciones y cautelas

La formulación tradicional usa $I_a = 0.2S$; otras calibraciones emplean relaciones diferentes.

El CN compuesto puede ocultar conectividad y distribución espacial de áreas impermeables.

Uso en la plataforma

Hidro usa $I_a = 0.2S$ y admite $30 \leq CN \leq 100$.

En un hietograma calcula primero Q acumulada para cada P acumulada y luego obtiene la lluvia efectiva incremental por diferencias sucesivas.

Referencias

- USDA SCS (1986). Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-04/20210107-Roy-Blunt-East-Locust-Creek-Reservoir-FSEIS-Appendix_D.pdf
- Curso HHA, capítulo 3.1c, Análisis y diseño hidrológico - tercera parte, Cap3.1cHHA2019.pdf, página PDF 13, página interna 12.

2.4. Número de curva CN

Índice adimensional determinado por cobertura, condición hidrológica, grupo de suelo y humedad antecedente.

$$CN_{comp} = \frac{\sum_i CN_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (19)$$

Aplicabilidad

Las tablas TR-55 combinan coberturas con grupos hidrológicos A, B, C y D.

Limitaciones y cautelas

Debe documentarse la condición de humedad antecedente y la fuente de clasificación del suelo.

CN cercanos a 100 producen una respuesta muy sensible y requieren especial revisión.

Uso en la plataforma

Hidro valida el intervalo 30–100 y permite perfiles ponderados por cobertura.

Referencias

- USDA SCS (1986). Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-04/20210107-Roy-Blunt-East-Locust-Creek-Reservoir-FSEIS-Appendix_D.pdf

3. Tormentas de diseño

Fundamento, procedencia y alcance de las distribuciones temporales disponibles para convertir una precipitación de diseño en un hietograma.

3.1. Qué representa una tormenta de diseño

Es una construcción temporal compatible con una profundidad o curva IDF de proyecto; no pretende reproducir un evento histórico particular.

Profundidad y distribución temporal

La curva IDF determina máximos de precipitación para duraciones y frecuencias seleccionadas. El hietograma reparte esa profundidad en intervalos. Dos tormentas con igual volumen, duración y período de retorno pueden producir hidrogramas diferentes si cambia la posición del pico o el orden de los incrementos.

Eventos sintéticos anidados

Los patrones sintéticos suelen anidar intensidades máximas de corta duración dentro de máximos de mayor duración. HEC-22 y NRCS advierten que estas distribuciones no son tormentas reales: son representaciones temporales para análisis y diseño.

Duración crítica

DINASA indica que la duración es un dato de proyecto y menciona como práctica frecuente adoptar dos veces el tiempo de concentración o más. En sistemas con almacenamiento o redes complejas debe comprobarse la duración que maximiza el caudal, el nivel o el volumen relevante.

Comparación de distribuciones temporales

El tiempo y la lluvia acumulada se normalizan entre 0 y 100 % para comparar perfiles de distinta duración. La figura muestra la posición y concentración temporal del volumen; no reemplaza la selección de la duración crítica ni la justificación regional del patrón.

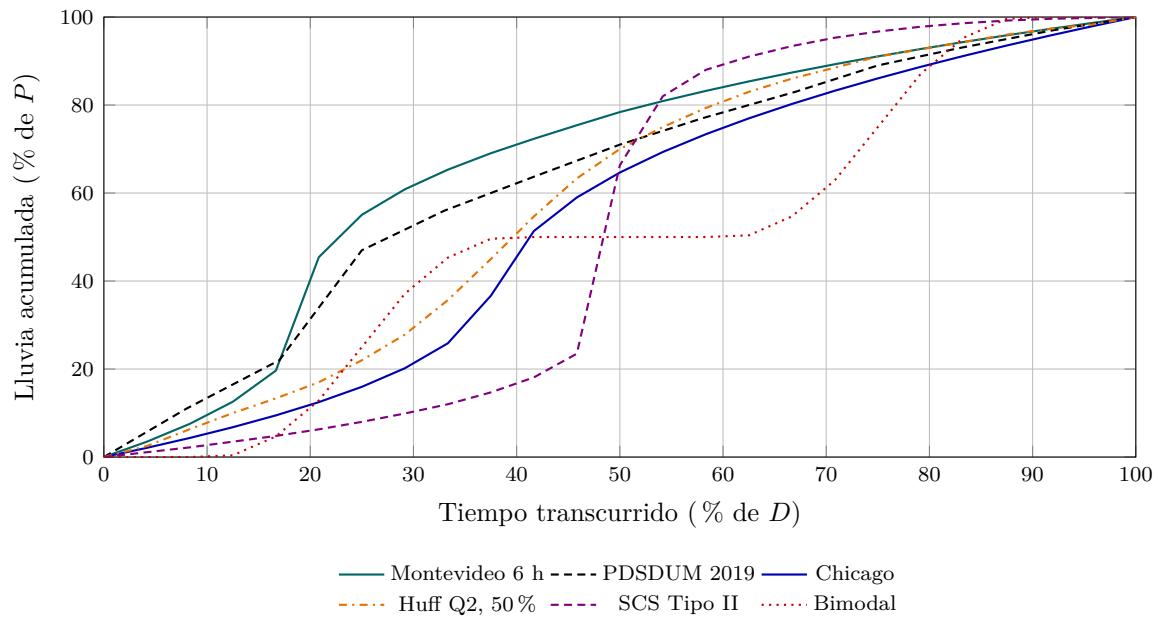


Figura 1: Comparación normalizada de distribuciones temporales utilizadas o documentadas por Hidro.

Limitaciones y cautelas

La frecuencia de la profundidad total no implica que cada ordenamiento temporal tenga la misma probabilidad de ocurrencia.

La distribución, duración, intervalo y posición del pico forman parte del criterio de diseño y deben quedar informados.

Referencias

- Manual DINASA, página PDF 53.
- Manual DINASA, página PDF 54.
- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, página PDF 11, página interna 10.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 4, hif24006.pdf, página PDF 55, página impresa 23. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif24006.pdf>

3.2. Curvas IDF de Uruguay

Las relaciones nacionales expresan la precipitación extrema a partir de una lluvia de referencia y tres correcciones independientes: frecuencia, duración y extensión espacial de la cuenca.

Una lluvia de referencia para cada lugar

El punto de partida es $P_{3,10}$: la precipitación máxima de tres horas asociada a un período de retorno de diez años en el lugar de interés. Su valor no se deduce del departamento como una constante administrativa, sino que se lee o interpola en el mapa de isoyetas de lluvias extremas. La formulación transforma esa referencia para representar otra duración, otra frecuencia y, cuando corresponde, el promedio espacial sobre una cuenca.

Corrección por período de retorno

El factor C_T aumenta al considerar eventos menos frecuentes. Está normalizado alrededor de $C_T = 1$ para diez años; por eso un período menor reduce la lluvia respecto de $P_{3,10}$ y uno mayor la incrementa. El eje de período de retorno se representa en escala logarítmica para que puedan leerse en un mismo gráfico desde eventos frecuentes hasta eventos poco frecuentes.

$$C_T(T_r) = 0,5786 - 0,4312 \log_{10} \left[\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right] \quad (20)$$

T_r se expresa en años. La expresión requiere $T_r > 1$; la plataforma adopta $T_r \geq 2$ años.

Corrección por duración

El factor C_D convierte la precipitación de tres horas a la profundidad acumulada correspondiente a una duración d . La relación es creciente y utiliza dos ajustes, uno para duraciones menores de tres horas y otro para duraciones mayores. Ambos tramos se encuentran aproximadamente en $C_D = 1$ alrededor de las tres horas.

$$C_D(d) = \begin{cases} \frac{0,6208 d}{(d + 0,0137)^{0,5639}}, & d < 3 \text{ h} \\ \frac{1,0287 d}{(d + 1,0293)^{0,8083}}, & d \geq 3 \text{ h} \end{cases} \quad (21)$$

La duración d se expresa en horas.

Corrección por área

Una medición puntual no equivale al promedio de lluvia sobre una cuenca extensa. C_A reduce la precipitación puntual a medida que aumenta el área; la reducción es más marcada para duraciones cortas. Por eso no existe una única curva $C_A(A)$: debe leerse junto con la duración, como una familia de curvas o ábaco.

$$C_A(A, d) = 1 - (0,3549 d^{-0,4272}) (1 - e^{-0,005792A}) \quad (22)$$

A se expresa en km^2 y d en horas. Esta corrección espacial no fue calibrada con registros uruguayos; el curso la atribuye a Chow (1994).

Cómo leer las representaciones

Los gráficos de C_T y C_D aíslan el efecto de una sola variable. El ábaco de C_A muestra, para cada duración rotulada, cómo cambia el factor con el área. Los tres coeficientes son adimensionales y se multiplican: ninguno representa por sí solo una intensidad ni una profundidad de lluvia.

$$P(d, T_r, A) = P_{3,10} C_T(T_r) C_D(d) C_A(A, d), \quad i = \frac{P}{d} \quad (23)$$

P se obtiene en milímetros cuando $P_{3,10}$ se ingresa en milímetros y d en horas; la intensidad media resultante i queda en mm/h .

Variables

$P_{3,10}$

Precipitación máxima de 3 h y 10 años en el punto de Uruguay (mm).

T_r

Período medio de retorno (años).

d

Duración de la precipitación acumulada (h).

A

Área sobre la que se promedia la precipitación (km²).

C_T

Factor de corrección por período de retorno (—).

C_D

Factor de corrección por duración (—).

C_A

Factor de reducción espacial por área y duración (—).

P

Profundidad máxima de precipitación (mm).

i

Intensidad media durante la duración d (mm/h).

Representación gráfica de los coeficientes

Las curvas se calculan con las mismas funciones que utiliza la plataforma. Los ejes logarítmicos permiten leer en una misma figura varios órdenes de magnitud.

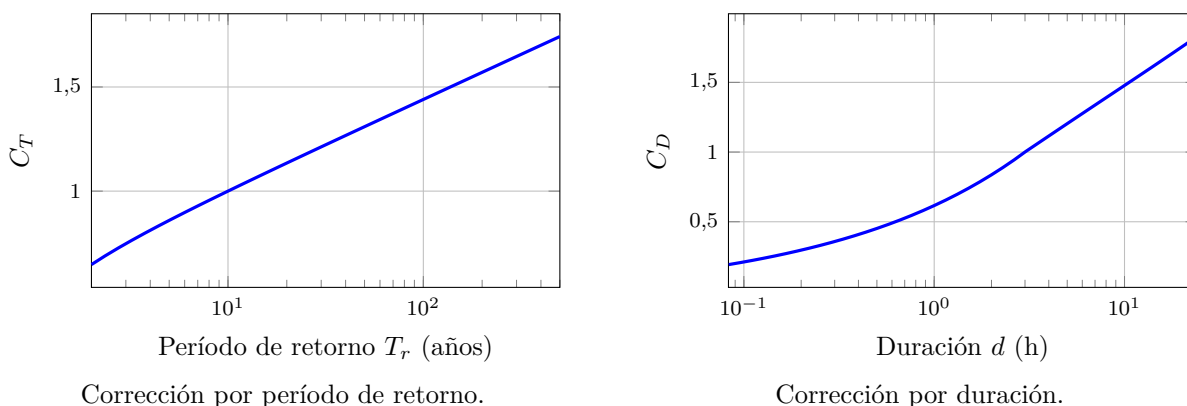


Figura 2: Factores univariados de la relación IDF nacional.

Aplicabilidad

Las relaciones C_T y C_D fueron ajustadas para Uruguay a partir de información histórica de precipitación del período 1906–1980. Para aplicarlas, $P_{3,10}$ debe obtenerse de la isoyeta correspondiente al lugar del proyecto.

La representación de C_A se muestra entre 0 y 300 km² y para duraciones de 0,5 a 24 horas, siguiendo la figura académica utilizada como fuente. Ese intervalo gráfico facilita la lectura, pero no constituye por sí solo una validación regional de la corrección espacial.

Limitaciones y cautelas

El mapa de isoyetas y las correcciones por duración y período de retorno proceden de información uruguaya; la corrección por área no. Su uso requiere reconocer esa diferencia de origen y justificar el criterio espacial cuando tenga incidencia en el diseño.

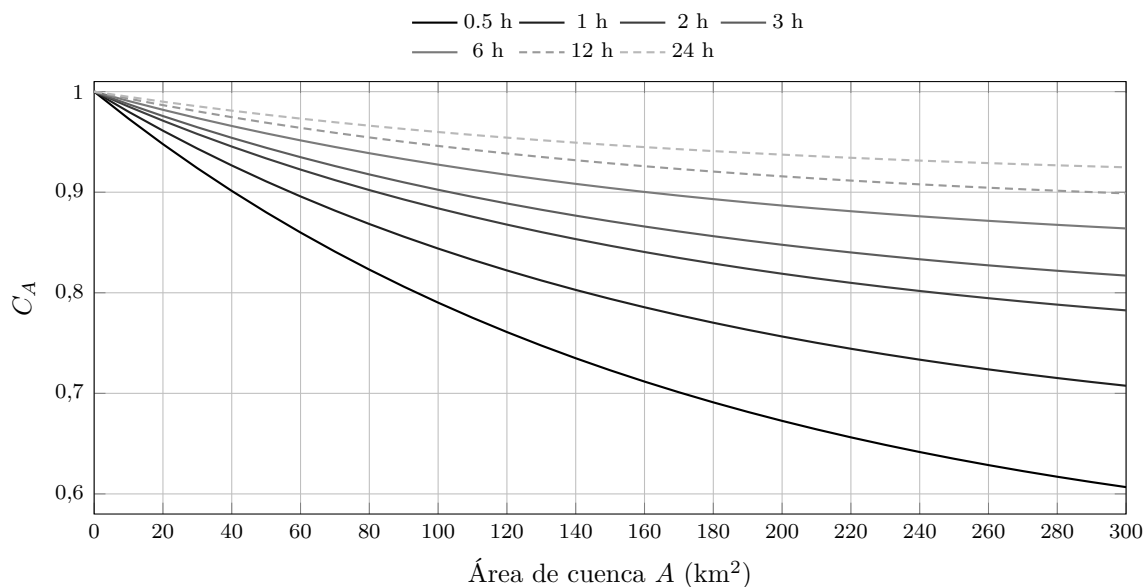


Figura 3: Ábaco de reducción espacial: cada curva corresponde a una duración.
Ecuaciones y representación basadas en el Curso HHA, capítulo 3.1a, páginas PDF 18–22, páginas internas 17–21. La corrección por área se atribuye a Chow (1994) y no fue calibrada con información uruguaya.

Una curva IDF asocia una magnitud extrema con una duración y una frecuencia. No describe por sí sola la distribución temporal interna de una tormenta ni sustituye el análisis de frecuencia de una serie observada cuando se dispone de datos locales suficientes.

Los valores de $P_{3,10}$ resumidos por departamento son únicamente orientativos. El valor de proyecto debe obtenerse para la ubicación concreta y quedar documentado.

Uso en la plataforma

Los cálculos usan d en horas, A en km^2 , P en milímetros e intensidad en mm/h . Para áreas de hasta 1 km^2 se adopta $C_A = 1$ y, por encima de 300 km^2 , se presenta una advertencia para promover una revisión regional específica.

Las tormentas sintéticas se escalan con la profundidad resultante, salvo que el análisis utilice una serie de precipitación aportada por el usuario.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.1a, Análisis y diseño hidrológico - primera parte, Cap3.1aHHA2019.pdf, páginas PDF 17–23, páginas internas 16–22; ecuaciones en las páginas PDF 18–19, páginas internas 17–18, y representaciones gráficas en las páginas PDF 21–22, páginas internas 20–21.

3.3. Montevideo 6 h

Patrón municipal de seis horas, con paso de cinco minutos y máximo alrededor de la primera hora, desarrollado para el drenaje de Montevideo.

Origen del patrón

El Plan Director de 1994 definió empíricamente una tormenta característica de 6 h, con máxima intensidad en la primera hora y bloques anidados de 5 min. La Guía MCE 2017 la construye por bloque alterno a partir de la ley de Montana de Montevideo y la simetriza respecto de la hora de máxima intensidad.

Revisión con registros del Prado

El estudio IMFIA 2013 revisó 170 tormentas de 1968–2005 y el Plan Director 2019 analizó además 110 eventos mayores que 20 mm. Los registros muestran un patrón adelantado: en general más de 60 % de la lluvia ocurre en la primera mitad. Se mantuvo el patrón anidado del PDSM para modelación, aunque se reconoce que no representa una tormenta observada típica.

Perfil PDSUM 2019

La revisión de 2019 propuso un perfil porcentual específico para el Plan Director. Ese perfil es una alternativa posterior y no es idéntico al bloque alterno de seis horas utilizado actualmente por Hidro.

Perfil temporal recomendado por PDSUM 2019

Duración acumulada (%)	Incremento de lluvia (%)
8	11
17	11
25	25
33	9
42	8
50	7
58	6
67	6
75	6
83	4
92	4
100	3

Tabla reproducida del Tomo XII, página PDF 75, página impresa 47. Se documenta para trazabilidad; todavía no es una opción separada en Hidro.

Procedimiento

1. Calcula profundidades acumuladas para duraciones sucesivas a partir de la IDF.
2. Obtiene los incrementos por diferencias y los ordena como bloques alternantes.
3. Ubica el máximo en el primer sexto de las 6 h, es decir, alrededor de la hora 1.

Aplicabilidad

Estudios urbanos de Montevideo cuando el organismo competente o el criterio del proyecto adopten el patrón municipal de seis horas.

Limitaciones y cautelas

El Plan Director 2019 califica al patrón histórico como práctico y anidado, pero altamente irreal; puede sobreestimar respuestas y recomienda comprobar la duración crítica.

No debe trasladarse como distribución observada universal a otras localidades de Uruguay.

El perfil PDSUM 2019 de la tabla y el bloque alterno municipal histórico son distribuciones diferentes.

Uso en la plataforma

Hidro fija 6 h, pico en $1/6$ y Δt predeterminado de 5 min, pero obtiene la profundidad mediante la formulación IDF nacional basada en $P_{3,10}$; no reproduce literalmente la tabla de Montana de la Guía MCE.

El perfil porcentual PDSUM 2019 se documenta, pero aún no está implementado como tormenta seleccionable independiente.

Referencias

- Intendencia de Montevideo (2017). Guía para la presentación de Medidas de Control de Escorrimento, imm-guia-medidas-control-escurrimiento-2017.pdf, páginas PDF 15–16, páginas impresas 13–14. <https://www.montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/guamce.pdf>
- Intendencia de Montevideo (2019). Plan Director de Saneamiento y Drenaje Urbano, Tomo XII: Estudios hidrometeorológicos y caracterización de recursos hídricos, imm-plan-director-tomo-xii-estudios-hidrometeorologicos-2019.pdf, páginas PDF 67–69 y 75–76, páginas impresas 39–41 y 47–48. <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/tomoxii-estudioshidrometeorologicosycharacterizacionderechid29112019.pdf>
- Intendencia de Montevideo (2019). Plan Director de Saneamiento y Drenaje Urbano, Tomo X: Implementación del SIG y del modelo matemático, imm-plan-director-tomo-x-modelo-matematico-2019.pdf, página PDF 75, página impresa 53. <https://montevideo.gub.uy/area-tematica/ambiente/saneamiento-y-drenaje-urbano/plan-director-de-saneamiento-y-drenaje-urbano>

3.4. IMFIA–DINAGUA

Distribución por bloques cuya duración unitaria se relaciona con T_c .

Construcción local por bloques

El Curso HHA presenta doce intervalos de ancho $T_c/7$, aproximadamente dos veces T_c . Las precipitaciones acumuladas se consultan en la IDF, sus diferencias forman los bloques y el mayor incremento se ubica en el séptimo intervalo; los restantes se alternan a ambos lados.

$$\Delta t = \frac{T_c}{7}, \quad D = 12\Delta t \quad (24)$$

Procedimiento

1. Calcula $\Delta t = T_c/7$ y doce duraciones acumuladas.
2. Obtiene los incrementos de lluvia desde la metodología IDF de DINAGUA.
3. Fija el mayor bloque en el séptimo intervalo y alterna los restantes.

Limitaciones y cautelas

La discretización resulta del T_c calculado y puede diferir del Δt elegido inicialmente por el usuario.

La posición del pico es una hipótesis de diseño; HHA señala que las tormentas más probables observadas en Prado tendieron a presentar el máximo en el primer cuarto.

Uso en la plataforma

Hidro redondea Δt a minutos enteros, con mínimo de 1 min.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, página PDF 11, página interna 10.
- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, páginas PDF 12–13, páginas internas 11–12.
- Manual DINASA, página PDF 54.

3.5. Racional: intensidad constante

Tormenta rectangular con intensidad IDF correspondiente a una duración igual a T_c .

Hipótesis temporal del método racional

La intensidad se mantiene constante durante T_c para que toda la cuenca pueda contribuir simultáneamente al caudal pico. DINASA señala que, en cuencas pequeñas, la variación interna de la intensidad puede ser poco relevante porque el tiempo de formación del pico es corto.

$$D = T_c, \quad i = i(T_c, T_r) \quad (25)$$

Aplicabilidad

Estimación de caudal pico bajo los supuestos y límites del método racional.

Limitaciones y cautelas

No representa la variación temporal interna de una tormenta real ni es adecuada por sí sola para evaluar volúmenes o almacenamiento.

Uso en la plataforma

Hidro usa una duración mínima igual a un intervalo temporal.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, página PDF 11, página interna 10.

- Manual DINASA, página PDF 53.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 4, hif24006.pdf, página PDF 56, página impresa 24.

3.6. Bloques alternantes

Ordena los incrementos derivados de la curva IDF alrededor de una posición de pico.

Derivación desde la IDF

Para duraciones Δt , $2\Delta t$, ..., D se calculan profundidades acumuladas. Las diferencias sucesivas son los bloques incrementales. El mayor se ubica en la posición de pico y los siguientes se colocan alternadamente antes y después en orden decreciente.

Procedimiento

1. Calcula lluvia acumulada para duraciones crecientes.
2. Obtiene incrementos por diferencias y los ordena de mayor a menor.
3. Alterna los bloques a izquierda y derecha de la posición de pico.

Limitaciones y cautelas

La forma depende de dt y de la posición elegida para el pico; ambos deben informarse.

Al anidar máximos de varias duraciones puede producir un patrón más severo que una tormenta observada típica.

Uso en la plataforma

Hidro usa $D = \max(2T_c, 1 \text{ h})$, pico central y dt seleccionado.

Referencias

- Manual DINASA, página PDF 53.
- Manual DINASA, página PDF 54.
- Curso HHA, capítulo 3.1b, Análisis y diseño hidrológico - segunda parte, Cap3.1bHHA2019.pdf, páginas PDF 12–13, páginas internas 11–12.

3.7. Chicago

Tormenta sintética que conserva intensidades de la curva IDF para duraciones anidadas.

Forma y coeficiente de avance

Keifer y Chu construyeron un hietograma continuo desde una ecuación IDF. El cociente r ubica el máximo como fracción de la duración total. El valor $r = 3/8$ surgió del estudio de aproximadamente cien tormentas de Chicago entre 1933 y 1958, donde predominaban picos adelantados.

$$i(t) = \frac{a [(1 - c)t + b]}{(t + b)^{c+1}} \quad (26)$$

Aplicabilidad

Diseño de drenaje urbano cuando una tormenta sintética derivada de IDF es apropiada.

Limitaciones y cautelas

El coeficiente de avance controla la ubicación del pico y debe justificarse con información local o un análisis de sensibilidad.

La calibración original proviene de Chicago; el informe FHWA muestra variación regional de r y advierte que una forma de pico único no representa tormentas con múltiples picos.

Uso en la plataforma

Hidro ajusta Sherman a DINAGUA, usa $r = 0.375$ y $D = \max(2T_c, 1 \text{ h})$.

Referencias

- Keifer, C. J. y Chu, H. H. (1957). Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000104>
- Yen, B. C. y Chow, V. T. (1977). Feasibility Study on Research on Local Design Storms, FHWA-RD-78-65, [fhwa-rd-78-65-design-storm-feasibility.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_listing/hec01/hydrology.cfm), páginas PDF 22–23, páginas impresas 6–7. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_listing/hec01/hydrology.cfm
- Curso HHA, capítulo 3.1a, Análisis y diseño hidrológico - primera parte, Cap3.1aHHA2019.pdf, páginas PDF 17–23, páginas internas 16–22; ecuaciones en las páginas PDF 18–19, páginas internas 17–18, y representaciones gráficas en las páginas PDF 21–22, páginas internas 20–21.

3.8. SCS Tipo II (24 h)

Distribución adimensional NRCS de 24 horas con alta concentración de lluvia cerca del centro.

Distribución estándar estadounidense

NRCS desarrolló cuatro distribuciones sintéticas de 24 h para grandes regiones climáticas de Estados Unidos. El Tipo II representa las tormentas más intensas en la mayor parte de ese país y anida máximos de corta duración dentro de la tormenta de 24 h.

Aplicabilidad

Regiones de Estados Unidos asignadas al Tipo II o estudios comparativos que lo requieran explícitamente.

Limitaciones y cautelas

Es un patrón regional histórico de Estados Unidos y no constituye una calibración para Uruguay. NRCS adoptó 24 h principalmente para representar volúmenes en el rango de cuencas que atiende; la duración puede exceder la necesaria para estimar sólo el pico.

Uso en la plataforma

Hidro fija $D = 24$ h, escala la profundidad con DINAGUA y usa Δt predeterminado de 60 min.

Referencias

- USDA NRCS (2021). National Engineering Handbook, Part 650, Chapter 2: Estimating Runoff Volume and Peak Discharge, nrcs-neh-650-chapter-2-estimating-runoff-2021.pdf, páginas PDF 8–9, páginas internas 650-2.3–650-2.4. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720531480/Chapter%2002%20-%20Estimating%20Runoff%20Volume%20and%20Peak%20Discharge.pdf>
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 4, hif24006.pdf, página PDF 55, página impresa 23. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif24006.pdf>

3.9. SCS Tipo I (24 h)

Distribución adimensional NRCS de 24 horas para regiones específicas del oeste de Estados Unidos.

Procedencia climática

NRCS asocia el Tipo I con sectores marítimos del oeste de Estados Unidos, Hawái y Alaska, caracterizados por inviernos húmedos y veranos secos. Es menos intenso que los patrones Tipo III y Tipo II.

Aplicabilidad

Regiones estadounidenses asignadas al Tipo I o comparaciones metodológicas deliberadas.

Limitaciones y cautelas

Su selección en Uruguay requiere una justificación explícita; no existe calibración local que permita adoptarlo por semejanza nominal de clima.

Uso en la plataforma

Hidro fija $D = 24$ h, escala la profundidad con DINAGUA y usa Δt predeterminado de 60 min.

Referencias

- USDA NRCS (2021). National Engineering Handbook, Part 650, Chapter 2: Estimating Runoff Volume and Peak Discharge, nrcs-neh-650-chapter-2-estimating-runoff-2021.pdf, páginas PDF 8–9,

páginas internas 650-2.3–650-2.4. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720531480/Chapter%2002%20-%20Estimating%20Runoff%20Volume%20and%20Peak%20Discharge.pdf>

3.10. Huff, segundo cuartil

Distribución probabilística donde la mayor intensidad ocurre en el segundo cuarto de la tormenta.

Curvas adimensionales por cuartil

Huff agrupa las tormentas según el cuarto de su duración en el que ocurre la mayor intensidad y expresa la lluvia acumulada como porcentaje de la duración y del volumen total. La opción Q2 al 50 % representa la mediana de las tormentas clasificadas en el segundo cuartil.

Evaluación para Montevideo

El Plan Director 2019 comparó curvas de Huff con registros del Prado. No adoptó una curva Huff como tormenta municipal porque sus máximos de distintas duraciones no quedan necesariamente anidados, condición útil para modelar una red con muchas cuencas de tiempos de respuesta distintos.

Aplicabilidad

Análisis probabilístico o comparativo cuando el segundo cuartil represente la población de tormentas estudiada.

Limitaciones y cautelas

El estudio original corresponde al medio oeste estadounidense; usar Q2 en Uruguay es una transferencia regional salvo calibración con registros locales.

La curva probabilística no asegura simultáneamente máximos IDF anidados para todas las duraciones.

Uso en la plataforma

Hidro utiliza Q2, probabilidad 50 %, $D = \max(2T_c, 1 \text{ h})$ y profundidad total DINAGUA.

Referencias

- Huff, F. A. (1967). Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- Intendencia de Montevideo (2019). Plan Director de Saneamiento y Drenaje Urbano, Tomo XII: Estudios hidrometeorológicos y caracterización de recursos hídricos, imm-plan-director-tomo-xii-estudios-hidrometeorologicos-2019.pdf, páginas PDF 67–69 y 75–76, páginas impresas 39–41 y 47–48. <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/tomoxii-estudioshidrometeorologicoscaracterizacionderechid29112019.pdf>

3.11. Bimodal (doble pico)

Hietograma paramétrico con dos picos para explorar eventos con dos pulsos de precipitación.

Escenario de sensibilidad

Las tormentas naturales pueden presentar varios pulsos y una forma de pico único no los representa. La opción bimodal de Hidro es un generador de escenarios: combina dos pulsos paramétricos y conserva el volumen total; no reproduce una distribución normativa publicada.

Procedimiento

1. Define posición y ancho de cada pico.
2. Distribuye el volumen entre ambos pulsos.
3. Normaliza la suma a la profundidad DINAGUA.

Aplicabilidad

Análisis de sensibilidad o eventos con evidencia de dos pulsos de lluvia.

Limitaciones y cautelas

No es una tormenta normativa ni una calibración regional por sí misma; los parámetros deben justificarse con datos o escenarios.

Uso en la plataforma

Hidro impone $D \geq 6$ h; valores iniciales: picos 0.25/0.75 y reparto 50/50.

Referencias

- Yen, B. C. y Chow, V. T. (1977). Feasibility Study on Research on Local Design Storms, FHWA-RD-78-65, fhwa-rd-78-65-design-storm-feasibility.pdf, páginas PDF 22–23, páginas impresas 6–7. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_listing/hec01/hydrology.cfm
- Curso HHA, capítulo 3.1a, Análisis y diseño hidrológico - primera parte, Cap3.1aHHA2019.pdf, páginas PDF 17–23, páginas internas 16–22; ecuaciones en las páginas PDF 18–19, páginas internas 17–18, y representaciones gráficas en las páginas PDF 21–22, páginas internas 20–21.

4. Parámetros de diseño y discretización

Decisiones que controlan frecuencia, resolución temporal y forma del hidrograma unitario.

4.1. Período de retorno

Intervalo medio entre excedencias de una magnitud; no es una garantía de que el evento ocurra una sola vez cada T_r años.

$$p = \frac{1}{T_r}, \quad P(\text{al menos una excedencia en } n \text{ años}) = 1 - (1 - p)^n \quad (27)$$

Limitaciones y cautelas

La selección depende de vida útil, consecuencias de falla, normativa y tolerancia al riesgo.

Uso en la plataforma

El formulario ofrece 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años; DINAGUA transforma T_r mediante el factor C_t .

Referencias

- DINAGUA (2009). Manual de diseño de sistemas de aguas pluviales urbanas, versión 1.0. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/noticias/actualizacion-del-manual-drenaje-dinagua>
- FHWA (2024). Highway Hydrology, Hydraulic Design Series No. 2, 3rd edition. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif24007.pdf>

4.2. Intervalo temporal Δt

Paso con el que se discretizan lluvia efectiva e hidrograma; no es sólo una preferencia de visualización.

Aplicabilidad

Debe ser suficientemente menor que T_c y que la escala de variación de la tormenta.

Limitaciones y cautelas

Un Δt grande suaviza el pico; uno muy pequeño aumenta cálculo y puede sugerir una precisión inexistente en los datos.

Uso en la plataforma

Hidro permite 5, 10, 15, 30 y 60 min, con reglas especiales para IMFIA y tormentas SCS.

4.3. Factor X del hidrograma triangular

X es un parámetro temporal adimensional de forma —también llamado factor de decaimiento o razón de recesión— que relaciona la duración de la rama descendente con el tiempo de ascenso del hidrograma triangular. No es un índice geomorfológico convencional como la compacidad, circularidad o elongación de la cuenca.

$$\begin{aligned} t_A = T_p &= 0,5\Delta t + 0,6T_c, \\ \frac{t_b}{t_A} &= 1 + X, \quad X = \frac{t_b}{t_A} - 1, \\ t_{\text{rec}} &= X t_A, \quad C_p = \frac{2}{1 + X} \end{aligned} \quad (28)$$

El manual de São Paulo usa t_A en las ecuaciones y t_p en la figura; Hidro denomina T_p al mismo tiempo de ascenso o tiempo al pico. Para un hidrograma unitario de 1 mm, A en km^2 y T_p en horas, $q_p = 0.278 (A/T_p)$ C_p en m^3/s . Un X mayor alarga la recesión y el tiempo base, representa más almacenamiento y reduce el pico.

Variables

$$t_A = T_p$$

Tiempo de ascenso o tiempo al pico (h).

X Razón entre el tiempo de recesión y el tiempo de ascenso (—).

$$X t_A = t_{\text{rec}}$$

Duración de la rama de recesión (h).

t_b Tiempo base total del hidrograma triangular (h).

C_p Factor de reducción o atenuación del caudal pico (—).

Valores orientativos del factor de decaimiento X

Descripción	X, factor de decaimiento	C_p , factor de reducción del pico
Método racional	1,00	1,00
Área urbana con pendiente grande	1,25	0,89
Método SCS	1,67	0,75
Uso mixto rural/urbano	2,25	0,62
Área rural ondulada	3,33	0,47
Área rural con pendiente pequeña	5,50	0,31
Área rural con pendiente muy pequeña	12,00	0,16

Reproducción de la tabla 1.16 del manual de São Paulo, que atribuye la clasificación a Wanielista y Yousef (1993). Son descriptores cualitativos para orientar escenarios, no rangos normativos ni una clasificación geomorfológica determinista.

Procedimiento

1. Determine t_A (T_p en Hidro) a partir de la duración de lluvia efectiva y del tiempo de concentración.

2. Calibre X con hidrogramas observados del sitio o de una cuenca hidrológicamente semejante; si no existen datos, declare la fila orientativa y analice sensibilidad.
3. Calcule la recesión $X \cdot t_A$, el tiempo base $t_b = (1 + X)t_A$ y el factor de pico $C_p = 2/(1 + X)$.
4. Calcule el caudal pico y verifique que la discretización preserve el volumen unitario de escorrentía.

Aplicabilidad

Permite comparar, de forma explícita, respuestas rápidas y recesiones prolongadas del mismo volumen de escorrentía.

El valor SCS/NRCS $X = 1,67$ corresponde al triángulo equivalente estándar con $C_p = 0,75$; otros valores requieren justificación independiente.

Limitaciones y cautelas

Granato (2012) encontró considerable variabilidad entre eventos y sitios: las razones de recesión se comportaron como variables aleatorias y no pudieron estimarse cuantitativamente con regresiones basadas en las características de cuenca disponibles.

Por ello X no debe tratarse como una propiedad geomorfológica determinista ni elegirse sólo para producir un pico conveniente.

La tabla es cualitativa y orientativa. Siempre que sea posible, calibre X con hidrogramas observados y documente la incertidumbre y el análisis de sensibilidad.

Uso en la plataforma

Hidro exige $X \geq 1$ y permite ejecutar varios valores separados por comas.

Después de discretizar el triángulo, normaliza sus ordenadas para que el área numérica represente exactamente 1 mm de escorrentía sobre la cuenca.

Referencias

- São Paulo (Município), Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano; Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (2012). Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos — fundamentos, vol. II, seção 1.3.5, figura 1.23 e tabela 1.16, página impressa 64 (página 66 do PDF). ISBN 978-85-66381-02-3. <https://legislacao.tcm.sp.gov.br/TerminalWeb/acervo/detalhe/55599>
- Wanielista, M. P.; Yousef, Y. A. (1993). Stormwater Management. New York: John Wiley, 579 p.
- Granato, G. E. (2012). Estimating Basin Lagtime and Hydrograph-Timing Indexes Used to Characterize Stormflows for Runoff-Quality Analysis. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5110, 47 p.; véanse especialmente las páginas 9, 12, 46 y 49–50 del PDF. <https://doi.org/10.3133/sir20125110>
- USDA NRCS (2007). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 16: Hydrographs, Appendix 16A, páginas 16A-1–16A-2 (páginas 33–34 del PDF). <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720461096/Chapter%2016%20-%20Hydrographs.pdf>
- USDA NRCS (2010). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 15: Time of Concentration. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720461053/Chapter%2015%20-%20Time%20of%20Concentration.pdf>

- USDA NRCS (2004). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720460920/Chapter%2010%20-%20Estimation%20of%20Direct%20Runoff%20from%20Storm%20Rainfall.pdf>
- Kent, K. M. (1968). A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds. USDA Soil Conservation Service, SCS-TP-149. Copia histórica archivada; no representa por sí sola política técnica vigente. <https://archive.org/details/methodforestimat149kent>
- Tucci, C. E. M.; Porto, R. L. L.; Barros, M. T. L. (coords.) (1995). Drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 428 p. <https://repositorio.usp.br/item/000900571>
- Snyder, F. F. (1938). Synthetic Unit-Graphs. Transactions, American Geophysical Union, 19(1), 447–454. <https://doi.org/10.1029/TR019i001p00447>
- Curso HHA, capítulo 3.1d, Análisis y diseño hidrológico - cuarta parte, Cap3.1dHHA2019.pdf, página PDF 2, página interna 1.
- Curso HHA, capítulo 3.1d, Análisis y diseño hidrológico - cuarta parte, Cap3.1dHHA2019.pdf, página PDF 10, página interna 9.

5. Fundamentos hidráulicos y flujo en canales

Relaciones de continuidad, resistencia, energía y cantidad de movimiento utilizadas por las calculadoras hidráulicas. Son fundamentos generales; los criterios geométricos, de seguridad y de aceptación siguen dependiendo de la normativa y del proyecto.

5.1. Ecuación de Manning

Relaciona caudal, geometría, rugosidad y pendiente de energía en flujo uniforme turbulento con contorno hidráulicamente rugoso.

$$Q = \frac{k_n}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2}, \quad R = \frac{A}{P} \quad (29)$$

Hidro trabaja internamente en SI y usa $k_n = 1$. En unidades estadounidenses la forma de HEC-22 usa $k_n = 1.486$; no deben mezclarse n , longitudes y constantes entre sistemas.

Variables

Q Caudal (m^3/s).

n Coeficiente de rugosidad de Manning ($\text{s}/\text{m}^{1/3}$).

A Área mojada (m^2).

R Radio hidráulico (m).

P Perímetro mojado (m).

S_f Pendiente de energía; en flujo uniforme coincide con la pendiente del fondo (m/m).

Aplicabilidad

Fundamento hidráulico general para canales y conductos que escurren a superficie libre en régimen aproximadamente uniforme.

HEC-22 emplea la misma relación para conductos y drenaje vial, con la constante correspondiente al sistema de unidades.

Limitaciones y cautelas

No representa por sí sola flujo transitorio, entrada en carga, pérdidas locales ni una línea piezométrica de red.

n es un parámetro práctico que depende de material, vegetación, irregularidad, alineación y estado de mantenimiento.

La hipótesis de resistencia es adecuada para flujo turbulento completamente rugoso; debe evitarse extrapolarla a regímenes fuera de ese marco.

Uso en la plataforma

Las calculadoras de canal trapezoidal y conducto circular resuelven el tirante normal por búsqueda de raíces y validan Q , n y pendiente positivos.

Para un conducto circular, Hidro dimensiona conservadoramente contra la capacidad a sección llena. HEC-22 advierte que el máximo a superficie libre ocurre cerca de $y/D = 0.93$; adoptar ese excedente requiere una decisión explícita de diseño.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 2.4, Flujo en canales, Cap2.4HHA2018.pdf, página PDF 9, página interna 2.4-8.
- Curso HHA, capítulo 2.4, Flujo en canales, Cap2.4HHA2018.pdf, página PDF 10, página interna 2.4-9.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 9, hif24006.pdf, página PDF 170, página impresa 138.

5.2. Número de Froude y tirante crítico

Clasifica el régimen según la relación entre velocidad e intensidad de propagación de ondas gravitatorias.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gA/T}}, \quad Fr^2 = \frac{Q^2 T}{gA^3} \quad (30)$$

Variables

V Velocidad media (m/s).

T Ancho superficial (m).

A/T Profundidad hidráulica (m).

Aplicabilidad

$Fr < 1$ identifica régimen subcrítico; $Fr > 1$, supercrítico; $Fr = 1$, crítico.

Limitaciones y cautelas

Las etiquetas de Hidro usan una banda numérica 0.95–1.05 como 'crítico'; es una tolerancia de presentación, no una nueva definición física.

Cerca de $Fr = 1$ las ecuaciones de flujo gradualmente variado se vuelven singulares y requieren tratamiento específico.

Uso en la plataforma

Hidro resuelve el tirante crítico de secciones trapezoidales mediante $Q^2/g = A^3/T$.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 2.2, Energía específica, Cap2.2HHA2018.pdf, página PDF 3, página interna 2.2-2.
- Curso HHA, capítulo 2.5, Flujo gradualmente variado, Cap2.5HHA2018.pdf, página PDF 1, página interna 2.5-0.

5.3. Energía específica

Energía por unidad de peso medida respecto al fondo de una sección.

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} = y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (31)$$

Variables

E Energía específica (m).

y Tirante (m).

α Coeficiente de corrección de energía (—).

Aplicabilidad

Fundamento hidráulico general para analizar tirantes alternos y control crítico en una sección.

Limitaciones y cautelas

La calculadora actual está restringida a sección rectangular y adopta $\alpha = 1$.

No sustituye una ecuación de energía entre secciones con pérdidas, bombeo o cambios de cota.

Uso en la plataforma

Hidro calcula E y el tirante alterno para Q , ancho y tirante ingresados, usando $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 2.2, Energía específica, Cap2.2HHA2018.pdf, página PDF 2, página interna 2.2-1.
- Curso HHA, capítulo 2.2, Energía específica, Cap2.2HHA2018.pdf, página PDF 3, página interna 2.2-2.

5.4. Cantidad de movimiento y resalto hidráulico

La función de cantidad de movimiento permite relacionar tirantes conjugados en un resalto.

$$M = A\bar{y} + \frac{Q^2}{gA} \quad (32)$$

Variables

M Función de cantidad de movimiento (m^3).

$\bar{y}$ Profundidad del centroide medida desde la superficie libre (m).

Aplicabilidad

Fundamento hidráulico general para el resalto ideal en canal prismático rectangular.

Limitaciones y cautelas

La igualdad de M supone que el tramo del resalto es corto y que las fuerzas de fricción son despreciables frente a presión y cantidad de movimiento.

Hidro calcula el tirante conjugado, pero no dimensiona cuencos disipadores ni verifica longitud, aireación o erosión.

Uso en la plataforma

La calculadora actual usa sección rectangular, distribución hidrostática y $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 2.3, Cantidad de movimiento y resalto hidráulico, Cap2.3HHA2018.pdf, página PDF 2, página interna 2.3-1.

5.5. Flujo gradualmente variado

Integra el perfil de la superficie libre cuando el tirante cambia gradualmente a lo largo de un canal prismático.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \quad (33)$$

Variables

S_0 Pendiente del fondo (m/m).

S_f Pendiente de fricción evaluada con Manning (m/m).

Aplicabilidad

Fundamento general para flujo permanente, unidimensional y gradualmente variado en canales prismáticos.

Limitaciones y cautelas

No es válido a través de un resalto u otra transición rápidamente variada.

La integración actual se detiene al aproximarse al tirante crítico y no cruza la singularidad $Fr = 1$.

Hidro no implementa actualmente un solver independiente de flujo rápidamente variado; sólo ofrece el cálculo de tirantes conjugados por cantidad de movimiento.

Uso en la plataforma

Hidro integra con RK23 secciones rectangulares, circulares y trapezoidales y calcula y_n e y_c como referencias.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 2.5, Flujo gradualmente variado, Cap2.5HHA2018.pdf, página PDF 1, página interna 2.5-0.
- Curso HHA, capítulo 2.4, Flujo en canales, Cap2.4HHA2018.pdf, página PDF 9, página interna 2.4-8.

5.6. Darcy–Weisbach, Reynolds y Colebrook

Determina el factor de fricción de Darcy según el régimen de flujo en conductos presurizados.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (Re \leq 2000), \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (34)$$

Variables

f Factor de fricción de Darcy (—).

Re Número de Reynolds (—).

K Rugosidad relativa epsilon/D (—).

Aplicabilidad

$f = 64/Re$ para flujo laminar plenamente desarrollado en tubo circular.

Colebrook para flujo turbulento, combinando rugosidad relativa y Reynolds.

Limitaciones y cautelas

En $2000 < Re < 8000$ el curso HHA identifica una zona de transición sin expresión general única.

Uso en la plataforma

Hidro usa $64/Re$ hasta $Re = 2000$, rechaza explícitamente la zona 2000–8000 y aplica Colebrook desde $Re = 8000$.

La rugosidad se ingresa en milímetros y el diámetro en metros; la aplicación convierte epsilon a metros antes de calcular K .

Referencias

- Curso HHA, capítulo 2.4, Flujo en canales, Cap2.4HHA2018.pdf, página PDF 7, página interna 2.4-6.

6. Alcantarillas, cunetas y captaciones

Criterios de control de entrada y salida, conducción superficial y captación. DINASA es la referencia aplicada para Uruguay; HEC-22 aporta procedimientos viales estadounidenses que requieren adaptación expresa.

6.1. Alcantarillas: control de entrada y salida

La carga requerida depende del régimen y de si gobiernan la entrada, el conducto o las condiciones aguas abajo.

$$HW_{sal} = h_o + K_e \frac{V^2}{2g} + h_f - LS_0, \quad h_f = L \left(\frac{nQ}{AR^{2/3}} \right)^2 \quad (35)$$

Variables

HW Carga aguas arriba respecto a la solera de entrada (m).

K_e Coeficiente de pérdida de entrada (—).

h_o Profundidad representativa en la salida (m).

Aplicabilidad

El curso HHA distingue seis tipos de flujo según sumergencia de entrada y salida, llenado del conducto y ubicación del control.

La comparación entre carga de control de entrada y de salida es un procedimiento de diseño de alcantarillas, no un criterio universal de suficiencia vial.

Limitaciones y cautelas

La herramienta actual es una aproximación simplificada tipo HDS-5: no reproduce explícitamente los seis tipos de flujo ni una curva completa de remanso aguas abajo.

Los coeficientes de entrada dependen de forma, material y terminación. Deben verificarse contra la edición y detalle constructivo aplicables.

La comprobación de sobrevertido usa un vertedero de coronamiento simplificado y no sustituye el análisis de seguridad vial o erosión.

Uso en la plataforma

Hidro compara control de entrada y salida, suma sobrevertido cuando HW supera la cota de camino y usa perímetro rectangular $2(D+b)$ en alcantarillas cajón.

Todas las dimensiones internas se convierten a SI; las ecuaciones de entrada codificadas conservan coeficientes empíricos y requieren una verificación documental adicional antes de uso normativo.

Referencias

- Curso HHA, capítulo 3.2, Diseño de alcantarillas, Cap3.2HHA2018.pdf, página PDF 1, página interna 3.2-0.
- Curso HHA, capítulo 3.2, Diseño de alcantarillas, Cap3.2HHA2018.pdf, página PDF 2, página interna 3.2-1.

6.2. Cunetas y flujo en calzada

La capacidad de una cuneta depende de la geometría transversal, la pendiente longitudinal, la rugosidad y el ancho de inundación admisible.

$$Q = \frac{k_n}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (36)$$

Aplicabilidad

La relación de Manning es fundamento hidráulico general.

Los anchos de inundación, recurrencias y condiciones de operación son criterios del proyecto y de la autoridad local.

Limitaciones y cautelas

HEC-22 desarrolla geometrías y criterios para carreteras de Estados Unidos; no deben transferirse automáticamente a calles uruguayas.

Hidro no dispone todavía de una calculadora específica de cunetas compuestas o flujo extendido sobre calzada.

Uso en la plataforma

Estado actual: brecha documentada; sólo pueden aproximarse secciones simples mediante la calculadora general de canales.

Referencias

- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 5, hif24006.pdf, página PDF 79, página impresa 47.
- Manual DINASA, página PDF 131.

6.3. Captaciones e interceptación

La eficiencia de una boca de tormenta o rejilla se define por la fracción del caudal de aproximación interceptada.

$$E = \frac{Q_i}{Q}, \quad Q_b = Q - Q_i \quad (37)$$

Variables

E Eficiencia de captación (—).

Q_i Caudal interceptado (m^3/s).

Q_b Caudal de bypass (m^3/s).

Aplicabilidad

DINASA aporta el criterio de drenaje urbano aplicable en Uruguay, incluida la consideración de obstrucción.

Limitaciones y cautelas

La capacidad depende del tipo de captación, pendiente transversal y longitudinal, depresión local, geometría y grado de obstrucción.

Los procedimientos detallados de HEC-22 son recomendaciones FHWA y requieren adaptar geometrías, residuos, mantenimiento y niveles de servicio locales.

Uso en la plataforma

Estado actual: Hidro no implementa una calculadora de captaciones ni propagación de bypass entre bocas.

Referencias

- Manual DINASA, página PDF 131.

7. Detención, enrutamiento y bombeo

Almacenamiento, estructuras de descarga y propagación de hidrogramas. La conservación de masa es fundamento general; coeficientes, niveles de servicio y redundancia son decisiones normativas y de proyecto.

7.1. Curva cota–almacenamiento

Relaciona el nivel del agua con el volumen disponible en el estanque.

$$S(h) = \int_{h_0}^h A_s(z) dz \quad (38)$$

Variables

S Volumen almacenado (m^3).

A_s Área superficial al nivel z (m^2).

Aplicabilidad

Fundamento geométrico general para detención o retención con superficie horizontal.

Limitaciones y cautelas

La hipótesis de nivel horizontal debe ser razonable; no representa almacenamiento dinámico distribuido.

La geometría debe incluir el rango completo de niveles que pueda alcanzar el enrutamiento.

Uso en la plataforma

Hidro genera curvas para estanques prismáticos rectangulares o con taludes simétricos; también dispone de integración trapezoidal de una curva área–cota en el núcleo de cálculo.

Referencias

- Manual DINASA, página PDF 190.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 10, hif24006.pdf, página PDF 258, página impresa 226.

7.2. Orificios y vertederos

Construyen la relación nivel–descarga de la obra de salida.

$$Q_o = C_d A \sqrt{2gH_c}, \quad Q_w = C_w L H^{3/2} \quad (39)$$

En el orificio, H_c se mide al centroide. Para el vertedero, C_w puede ser un coeficiente SI dimensionado que ya incorpore $\sqrt{2g}$, o bien C_d por $\sqrt{2g}$; ambas convenciones no deben mezclarse.

Variables

C_d Coeficiente adimensional de descarga del orificio (—).

C_w Coeficiente dimensionado de vertedero usado en $Q=C_w L H^{3/2}$ ($m^{1/2}/s$).

H_c Carga al centroide del orificio (m).

Aplicabilidad

DINASA indica C_d aproximadamente 0.6–0.7 para orificios de descarga en el contexto presentado.

HEC-22 detalla la medición de carga y rangos de coeficientes como guía FHWA; el tipo de cresta y la geometría local deben comprobarse.

Limitaciones y cautelas

La ecuación de orificio completo no describe la transición parcialmente sumergida cuando el agua cubre sólo parte de la abertura.

No se modelan sumergencia aguas abajo, contracciones laterales, ahogamiento del vertedero ni pérdidas de aproximación.

Uso en la plataforma

Hidro interpreta la cota ingresada para el orificio como cota de solera y calcula la carga sobre el centroide en solera + $D/2$.

El vertedero normal usa C_d adimensional y $\sqrt{2g}$; el aliviadero de emergencia usa directamente un coeficiente SI $C_w = 1.70$ sin volver a multiplicar por $\sqrt{2g}$.

Referencias

- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 10, hif24006.pdf, página PDF 249, página impresa 217.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 10, hif24006.pdf, página PDF 241, página impresa 209.
- Manual DINASA, página PDF 147.

7.3. Enrutamiento por Puls modificado

Resuelve por intervalos la continuidad en un depósito de nivel horizontal mediante una curva de indicación de almacenamiento.

$$I_1 + I_2 + \left(\frac{2S_1}{\Delta t} - O_1 \right) = \left(\frac{2S_2}{\Delta t} + O_2 \right) \quad (40)$$

Procedimiento

1. Construir curvas monotónicas cota–almacenamiento y cota–descarga sobre el mismo rango de niveles.
2. Elegir Δt compatible con la resolución del hidrograma y las variaciones del almacenamiento.

3. Resolver en cada paso la nueva indicación $2S/\Delta t + O$ y recuperar nivel, almacenamiento y descarga.

Aplicabilidad

Fundamento general de conservación de masa para un depósito con superficie aproximadamente horizontal y descarga función del nivel.

Limitaciones y cautelas

Si el enrutamiento supera la cota máxima de las curvas, el resultado no debe aceptarse por extrapolación silenciosa.

La herramienta actual comienza con el estanque vacío; un nivel inicial distinto requiere ampliar la implementación.

Uso en la plataforma

Hidro interpola las curvas en SI y reporta picos, atenuación, nivel y almacenamiento máximos.

Referencias

- Manual DINASA, página PDF 190.
- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 10, hif24006.pdf, página PDF 258, página impresa 226.

7.4. Muskingum y Muskingum–Cunge

Propaga un hidrograma por un tramo representando almacenamiento prismático y en cuña.

$$O_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 O_j, \quad 2KX \leq \Delta t \leq 2K(1 - X) \quad (41)$$

Variables

K Constante de almacenamiento o tiempo de viaje (s).

X Ponderación del almacenamiento en cuña, usualmente 0–0.5 (—).

Aplicabilidad

DINASA presenta Muskingum como procedimiento de traslado de crecidas; su calibración debe representar el tramo real.

Limitaciones y cautelas

La estabilidad y positividad de los coeficientes dependen de Δt , K y X .

La variante Cunge actual supone canal ancho, relación cinemática $c = 5V/3$ y parámetros constantes evaluados al caudal pico; es una aproximación, no un solver hidráulico dinámico.

Uso en la plataforma

Hidro comprueba $2KX \leq \Delta t \leq 2K(1-X)$, informa la estabilidad y fuerza resultados negativos a cero.

Referencias

- Manual DINASA, página PDF 185.

7.5. Estaciones de bombeo

El diseño combina curvas de bombas y sistema, volumen de pozo, niveles de arranque y parada, redundancia y condiciones de succión.

Aplicabilidad

HEC-22 ofrece un procedimiento FHWA para estaciones de bombeo viales; es orientación estadounidense, no exigencia uruguaya.

Limitaciones y cautelas

La verificación de NPSH disponible frente a requerido es esencial para controlar cavitación y depende de datos del fabricante y condiciones de sitio.

Deben definirse operación de emergencia, suministro eléctrico, redundancia, mantenimiento y consecuencias de falla mediante criterio local.

Uso en la plataforma

Estado actual: Hidro no implementa dimensionamiento ni simulación de estaciones de bombeo.

Referencias

- FHWA HEC-22, 4th ed., capítulo 12, hif24006.pdf, página PDF 286, página impresa 254.