



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CARAMPANGUE

POR

Yerson Alejandro Ríos Soto

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Óscar Eduardo Link Lazo

Profesor Comisión
Felipe Alexis Orellana Muñoz

Enero 2026
Concepción (Chile)

© 2026 Yerson Alejandro Ríos Soto

© 2026 Yerson Alejandro Ríos Soto

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

Se analiza la infiltración en la cuenca del río Carampangue a partir de una caracterización de suelos y ensayos de infiltración realizados mediante anillo simple. Los valores de infiltración medidos se usaron para ajustar la ecuación de Green-Ampt modificada por Ogden y Saghaian (1997) para incorporar la redistribución de humedad y considerar así la variación temporal de la infiltración durante una tormenta. Se caracterizó la lluvia mediante el análisis de medición de 19 estaciones meteorológicas instaladas en la cuenca y/o sus alrededores. Se realizó un balance entre la lluvia y la infiltración a una escala de tiempo subhoraria para calcular la generación de escorrentía superficial durante una tormenta. Los resultados muestran una marcada influencia del efecto orográfico en la distribución espacial de las precipitaciones. Asimismo, se observa una variabilidad importante en la infiltración, por ejemplo, en Bajo Cifuentes se encontraron tasas de infiltración superiores a 300 mm/h, mientras que en Trongol Alto se encontraron valores cercanos a 11 mm/h, atribuidos principalmente a la compactación superficial de los suelos. El balance hídrico permitió estimar la generación de escorrentía en función de la humedad antecedente y características del suelo, aportando una herramienta útil para la gestión hidrológica y el diseño de obras hidráulicas.

ABSTRACT

Infiltration in the Carampangue River basin is analyzed based on soil characterization and infiltration tests conducted using the single-ring method. The measured infiltration values were used to adjust the Green-Ampt equation, modified by Ogden and Saghafian (1997) to incorporate moisture redistribution, thereby considering the temporal variation of infiltration during a storm. Rainfall was characterized through the analysis of measurements from 19 meteorological stations installed within the basin and its surroundings. A balance between rainfall and infiltration was performed at a sub-hourly time scale to calculate surface runoff generation during a storm. The results show a marked influence of the orographic effect on the spatial distribution of precipitation. Likewise, a significant variability in infiltration is observed; for instance, in Bajo Cifuentes, infiltration rates exceeding 300 mm/h were found, while in Trongol Alto, values near 11 mm/h were recorded, primarily attributed to surface soil compaction. The water balance allowed for the estimation of runoff generation as a function of antecedent moisture and soil characteristics, providing a useful tool for hydrological management and the design of hydraulic works.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Margot y Miguel, por enseñarme la virtud del esfuerzo, el trabajo duro y la perseverancia, por haberme apoyado a lo largo de este proceso y por el amor que siempre me han brindado.

A mi hermana, Romina, por ser un ejemplo que seguir, por darme ánimos y comprensión.

A mi pareja, Ángela, por el soporte que me brindó y ser un escape en momentos que lo necesité.

A mis amigos, quienes me acompañaron y alentaron durante esta gratificante etapa.

A todo el que me apoyó y me ofreció una palabra de ánimo durante este periodo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), por el financiamiento otorgado mediante el Proyecto Anillo ATE220021 “Climate change and the sociohydrology of floods”. El cual cumplió un rol fundamental para la obtención de datos utilizados en la investigación.

También agradezco la labor de don René Iribarren Catalán, Vicente Saenger Derache, Pablo Villegas Salgado, Rocío Coloma Fuentes y Matías Riquelme Fernández, quienes formaron parte del equipo de trabajo en terreno, recolección y tratamiento de datos que fueron utilizados. De quienes aprendí mucho y me ofrecieron su ayuda a lo largo de esta investigación.

Por último, quiero dar las gracias a mi profesor guía Óscar Link Lazo por su ayuda, buena disposición, consejos y confianza a lo largo de este proceso. Así como a mi profesor comisión Felipe Orellana Muñoz por su buena disposición y apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos generales y específicos.....	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcances del estudio.....	2
1.4. Principales resultados.....	2
1.5. Organización de la memoria.....	3
CAPÍTULO 2: BALANCE HÍDRICO	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Precipitación.....	4
2.3. Infiltración.....	4
2.4. Escorrentía.....	15
2.5. Conclusión.....	16
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA	17
3.1. Introducción.....	17
3.2. Área de estudio.....	17
3.2.1. Precipitación.....	20
3.2.2. Suelo.....	25
Clasificación de suelos.....	26
3.2.3. Infiltración.....	29
Pruebas de infiltración	29
3.3. Estimación de la tasa de infiltración.....	33
3.4. Balance hídrico y cálculo de la escorrentía	35
3.5. Conclusión.....	36

CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	37
4.1. Introducción.....	37
4.2. Caracterización espaciotemporal de la precipitación.	37
4.3. Caracterización espacio-temporal de la infiltración.....	40
4.4. Balance hídrico de la esorrentía a escala sub-horaria.....	43
4.5. Conclusión.....	45
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	46
Referencias	48
Anexo 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible	52
Anexo 3.2	53
Anexo 3.3	58
Anexo 3.4	59
Anexo 4.3	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varias clases de suelos. Rawls, Brakensiek y Miller (1983)	11
Tabla 2-2. Condiciones antecedentes de humedad (Chow et al 1994)	14
Tabla 3-1. Disponibilidad de datos de estaciones meteorológicas para tormentas estudiadas	22
Tabla 3-2. Tabla tipo de ingreso de datos al archivo .CSV para su posterior lectura	23
Tabla 3-3. Diámetros específicos y coeficientes en sitios muestreados.	28
Tabla 3-4. Altura de presión en el frente húmedo para tipos de suelo (Bouwer, 1999)	31
Tabla 3-5. Resultados de tasa de infiltración corregidas por estación.....	32
Tabla 3-6. Parámetros de Green-Ampt calibrados por zona.....	33
Tabla 3-7. Tasas de infiltración por tipo de suelo y unidad geológica	35
Tabla 4-1. Resumen de precipitación acumulada por tormenta y su duración.	40
Tabla 4-2. Escorrentía generada e intensidad máxima tormenta del 14 y 15 de junio del 2025.	43
Tabla 4-3. Caudal de escorrentía generado por uso de suelo para tormenta 14 y 15 de junio de 2025.	43
Tabla 4-4. Caudal generado por unidad geológica para tormenta 14 y 15 de junio de 2025	44
Tabla 4-5. Caudal de escorrentía generada e intensidad máxima tormenta del 31 de julio del 2025.	44
Tabla 4-6. Caudal generado por uso de suelo para tormenta 31 de julio de 2025	45
Tabla 4-7. Caudal generado por unidad geológica para tormenta 31 de julio de 2025	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Distribución de humedad en un perfil de suelo (Fuente: Ven te Chow et al. 1994)	5
Figura 2-2. Esquema del proceso de infiltración del agua en el suelo	6
Figura 2-3. Infiltración en el tiempo según la ecuación de Horton.	8
Figura 2-4. Variables en el modelo de infiltración de Green-Ampt	9
Figura 3-1. Ubicación y elevaciones del área de estudio	17
Figura 3-2. Geología en la cuenca del río Carampangue. (Sernageomin, 2003)	19
Figura 3-3. Uso de suelo cuenca del río Carampangue	20
Figura 3-4. Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas.....	21
Figura 3-5. Curva de doble masa estación Ramadillas periodo junio-octubre 2024.....	23
Figura 3-6. Máquina de penetración dinámica en laboratorio de suelos, Facultad de Ingeniería.	26
Figura 3-7. Análisis granulometría sitios de estudio	27
Figura 3-8. Datos de infiltración originales para sitios de estudio	29
Figura 3-9. Corrección por divergencia lateral para anillo simple. (Bouwer, 1986).....	30
Figura 3-10. Corrección de infiltración. (Bouwer 1999). Izquierda: Corrección arena media. Derecha: Corrección arena fina	31
Figura 3-11. Tasas de infiltración corregidas	32
Figura 3-12. Ajustes con ecuación de Green-Ampt a curvas de infiltración corregidas	33
Figura 4-1. Precipitación 2025 durante las tormentas ocurridas el 29 y 30 de marzo (a), 21 y 23 de abril (b), 14 y 15 de junio (c), 30 de julio y 2 de agosto (d).....	38
Figura 4-2. Variación de la tasa de infiltración durante las tormentas ocurridas el 29 y 30 de marzo (a), 21 y 23 de abril (b), 14 y 15 de junio (c), 30 de julio y 2 de agosto (d)	41

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Infiltración es el proceso, por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por él o alcanza el acuífero.

El agua que infiltra en el suelo puede tomar dos rutas. Una posibilidad es una vez infiltrada, se encuentre con un estrato permeable que le permita percolar profundo hasta alcanzar los acuíferos o napas subterráneas donde escurrirá como flujo subterráneo; La otra posibilidad es que el agua llegue a estratos impermeables que le impidan la percolación profunda y se desplace en forma subsuperficial. En este caso, puede agregarse a la escorrentía superficial.

De las cuatro comunas que abarca la cuenca del río Carampangue al menos 12000 hogares obtienen agua para su consumo mediante la utilización de pozos o norias o directamente desde ríos, vertientes o esteros (Censo 2024), lo que vuelve a la escorrentía y al flujo subterráneo en bienes de mayor relevancia dentro del sector donde la tercera industria de mayor importancia es la agricultura, ganadería y silvicultura.

Por otro lado, cuantificar la escorrentía es a su vez de especial relevancia para la zona, ya que es afectada por las inundaciones provocadas por las crecidas de río Carampangue con una recurrencia de 2.23 años (Rojas et al 2010).

La presente investigación realiza un análisis espacial de las características de la cuenca para cuantificar la generación de escorrentía a partir de la lluvia y la infiltración a la escala temporal de la tormenta.

El Anexo 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible.

1.2. Objetivos generales y específicos

1.2.1. Objetivo general

Realizar un balance hídrico en la cuenca del río Carampangue, con especial énfasis en el análisis de la distribución espacial de la lluvia, la infiltración y la escorrentía durante una tormenta.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la lluvia en la cuenca del río Carampangue.
- Caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la infiltración en la cuenca del río Carampangue.
- Realizar el balance hídrico calculando la escorrentía a escala subhoraria en la cuenca del río Carampangue.

1.3. Alcances del estudio

En esta memoria se propone modelar la capacidad de infiltración como un atributo variable en el tiempo tomando como base la ecuación propuesta por Green & Ampt (1911), modificada por Odgen y Saghafian (1997) para redistribuir la humedad del suelo en periodos con baja o nula precipitación. Además, se considera la condición de Dunkerley (2016) para que dicha recuperación no sea excesiva, evitando recuperaciones abruptas de la infiltración en eventos de alta intensidad y larga duración.

1.4. Principales resultados

Dentro del análisis realizado se observó que la precipitación en la cuenca está fuertemente controlada por la topografía, registrándose los mayores acumulados en estaciones ubicadas en altitud. Por otra parte, los ensayos de infiltración evidenciaron contrastes marcados: mientras los suelos arenosos de Bajo Cifuentes mostraron tasas superiores a 300 mm/h, mientras que suelos compactados como

Trongol Alto la capacidad de infiltración disminuyó hasta 11 mm/h. Además, se comprobó que la condición de humedad antecedente juega un rol determinante en la respuesta hidrológica, ya que ante una condición saturada hay una reducción significativa en su capacidad de infiltración, incrementando la probabilidad de generación de escorrentía, lo que puede ser bien estimado con el algoritmo creado. El modelo de balance hídrico permitió estimar la escorrentía generada en tormentas específicas, identificar los sectores con mayor aporte superficial y proporcionar una herramienta útil para la gestión hidrológica local.

1.5. Organización de la memoria

Este documento consta de cinco capítulos los cuales son: “Introducción”, “Balance hídrico”, “Materiales y metodología”, “Resultados” y “Conclusiones”. En el primero se presenta la motivación, los objetivos, así como los alcances de la investigación. En el segundo capítulo se presenta revisión bibliográfica acerca del tema de investigación, así como los procesos que controlan el balance hídrico. El tercer capítulo aborda la descripción del área de estudio, materiales, como las fuentes de información hidrometeorológica y la metodología utilizada para hacer el balance hídrico. En el capítulo cuarto se muestran tanto los resultados obtenidos en base a los objetivos y la interpretación de estos. Finalmente, en el quinto capítulo presenta las conclusiones de la investigación realizada.

CAPÍTULO 2: BALANCE HÍDRICO

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los procesos que controlan el balance hídrico, que son la precipitación, infiltración y escorrentía.

2.2. Precipitación

Precipitación en hidrología se entiende por toda agua de origen meteórico que cae o se deposita sobre la superficie terrestre. Comprende en consecuencia, la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío y la escarcha.

La cantidad de agua que precipita dentro de un período de tiempo, se denomina intensidad y permite caracterizar una precipitación a lo largo de su duración mediante un hietograma. Sin embargo, la representatividad de este dato depende directamente de la resolución temporal de los datos. Dunkerley (2016) advierte que el análisis de tormentas en largos intervalos de tiempo tiende a suavizar el comportamiento real del evento, enmascarando las ráfagas de alta intensidad de corta duración dentro de la tormenta. Estas fluctuaciones intra-evento frecuentemente constituyen los momentos críticos donde la intensidad instantánea supera la capacidad de infiltración del suelo.

La precipitación orográfica, es una lluvia típica en zonas cordilleranas como la presente en la geografía de la cuenca del río Carampangue (Rojas et al. 2021). Esta precipitación ocurre cuando la circulación de masas de aire húmedo se ve obstaculizada por la presencia de cadenas montañosas, el aire se ve obligado a ascender por la presencia de la barrera física, produciéndose su enfriamiento con la consiguiente condensación y lluvia.

2.3. Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Por ello el conocimiento del suelo es fundamental, ya que éste no es solo el depósito de agua, sino un regulador activo del ciclo del agua Horton (1933). Así, la cantidad de lluvia que se convierte

en escorrentía superficial no depende solo de si el suelo está completamente saturado, sino más bien de su capacidad de infiltración en cada momento de la tormenta.

Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad, la conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el suelo. Estratos de suelos con propiedades físicas diferentes pueden superponerse unos sobre otros formando horizontes. Los suelos también presentan una gran variabilidad espacial aún dentro de áreas pequeñas. Como resultado de estas grandes variaciones espaciales y temporales de las propiedades del suelo, la infiltración es un proceso muy complejo que puede describirse mediante ecuaciones matemáticas solamente en forma aproximada.

La distribución de humedad dentro del perfil del suelo durante el movimiento hacia abajo del agua se ilustra en la Figura 2-1.

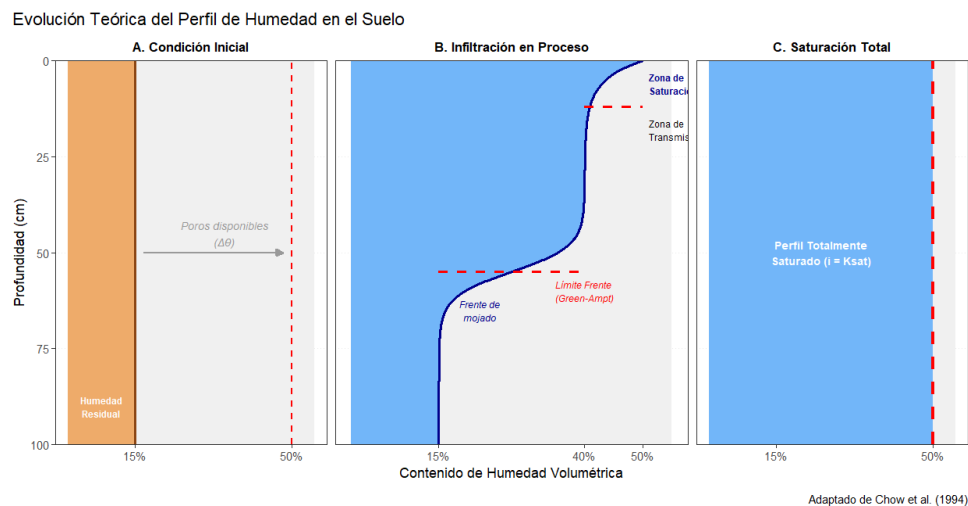


Figura 2-1. Distribución de humedad en un perfil de suelo (Fuente: Ven te Chow et al. 1994)

Existen cuatro zonas de humedad: una zona saturada cerca de la superficie, una zona de transmisión de flujo no saturado y contenido de humedad aproximadamente uniforme, una zona de mojado en la cual la humedad decrece con la profundidad y un frente de mojado en el cual el cambio de contenido de la humedad con la profundidad es tan grande que da la apariencia de una discontinuidad aguda entre el suelo mojado arriba y el suelo seco debajo. Dependiendo de la cantidad de infiltración y de las propiedades físicas del suelo, el frente mojado puede penetrar en el suelo desde unas pocas pulgadas hasta varios pies.

Horton (1933) llama capacidad de infiltración de un suelo, a la máxima cantidad de agua de lluvia que puede absorber en la unidad de tiempo y en unas condiciones definidas previamente. Precisamente, la relación entre la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración será la que determine la cantidad de agua que penetrará en el suelo y la que por escorrentía directa alimentará cauces de las corrientes superficiales. Esta capacidad de infiltración va decreciendo con el tiempo a partir de un máximo al comienzo de la lluvia y después de alguna fluctuación hasta que converja a la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}).

Un método de medición de la infiltración consiste en la prueba con anillos de infiltración, que son cilindros de metal que se introducen a golpes alrededor de 5 centímetros en el suelo. El volumen interno se inunda con agua y se mide la velocidad a la que el agua se interna en el suelo con el fin de determinar la conductividad hidráulica. Las mediciones deben continuar hasta alcanzar una tasa de descenso constante. En la Figura 2-2 se puede observar el perfil transversal de un infiltrómetro simple hincado en terreno con la representación de las líneas de infiltración que traza el agua al ingresar en el suelo.

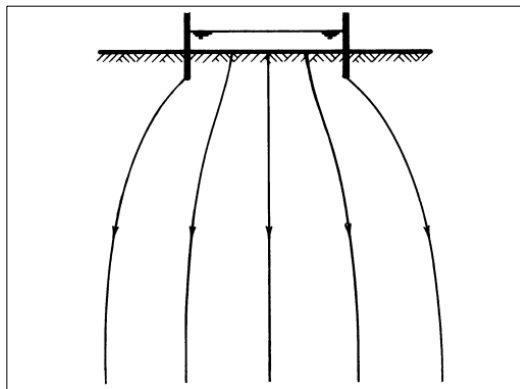


Figura 2-2. Esquema del proceso de infiltración del agua en el suelo utilizando un infiltrómetro de anillo simple (Bouwer, 1986)

Lo que se aprecia es cómo el fluido posee tanto una componente vertical como otra horizontal. Precisamente, la componente horizontal del movimiento es el error más significativo de este tipo de infiltrómetros. Se debe considerar entonces que la tasa de infiltración del infiltrómetro será mayor que la tasa de infiltración verdadera para el flujo vertical.

La divergencia en el flujo se presenta debido a que no existe una saturación del suelo alrededor del anillo, por lo que parte del agua que se encuentra infiltrando se mueve hacia el exterior del infiltrómetro a causa de la succión capilar.

Otra forma de obtener la infiltración es mediante ecuaciones empíricas basadas principalmente en la ley de Darcy y otras ecuaciones en base a propiedades físicas del suelo. Richards (1931), a partir de la ley de Darcy desarrolló una ecuación que modela el flujo unidimensional no saturado y no permanente en un medio poroso:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left(D \frac{d\theta}{dz} + K \right) \quad (2.1)$$

En donde $\frac{d\theta}{dt}$ corresponde a la variación del contenido de humedad del suelo con respecto al tiempo $[1/T]$, $\frac{\delta\theta}{\delta z}$ es la variación del contenido de humedad del suelo con respecto a la profundidad $[1/L]$, D es la difusividad del agua en el suelo, que corresponde al producto $K \frac{d\psi}{d\theta}$, K es la conductividad hidráulica $[L/T]$ y $\frac{d\psi}{d\theta}$ es la variación de la energía correspondiente a las fuerzas de succión del suelo con respecto al contenido de humedad del suelo.

Diversos autores como Horton (1933) y Philip (1957). Establecieron soluciones en función de parámetros como la tasa de infiltración $f(t)$, infiltración acumulada $F(t)$, adsorción (S) y conductividad hidráulica K . Horton (1939) profundizó sobre el comportamiento dinámico del proceso de infiltración mediante análisis de experimentos en parcelas de escurrimiento. Observó que la infiltración empieza en alguna tasa f_0 y decrece exponencialmente hasta que alcanza una tasa mínima constante f_c . Horton atribuyó dicho decaimiento a la compactación de la superficie de suelo por el impacto de la lluvia y al hinchamiento de los coloides, fenómenos que ocurren en la capa externa del suelo agotando la capacidad de absorción durante las primeras horas de una tormenta. Para describir matemáticamente esta variación temporal, Horton propuso la siguiente ecuación empírica:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2.2)$$

La solución a la ecuación (2.2), se puede ver de manera gráfica en la Figura 2-3.

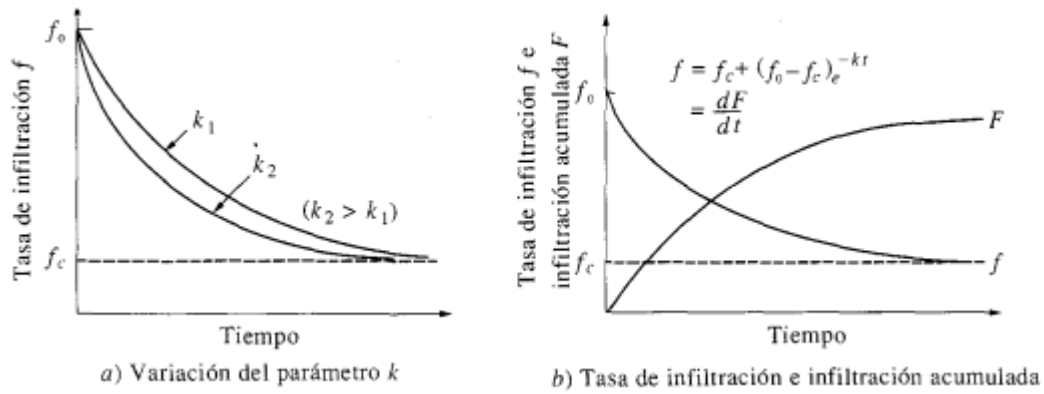


Figura 2-3. Infiltración en el tiempo según la ecuación de Horton.

Philip (1957, 1969) resolvió la ecuación de Richards bajo unas condiciones menos restrictivas que las originales suponiendo que K y D podían variar con el contenido de humedad θ . Philip empleó la transformación de Boltzmann $B(\theta) = zt^{-1/2}$ para convertir la ecuación de Richards 1D en una ecuación diferencial ordinaria para B , y resolvió esta ecuación mediante una serie infinita que describía la infiltración acumulada $F(t)$, que se aproxima por la ecuación (2.3):

$$F(t) = St^{1/2} + Kt \quad (2.3)$$

donde S es sorptividad, que es una función del potencial de succión del suelo, y K es la conductividad hidráulica. Por diferenciación

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K \quad (2.4)$$

A medida que $t \rightarrow \infty$, $f(t)$ tiende a K . Los dos términos de la ecuación de Philip representan los efectos de la profundidad de succión del suelo y de la profundidad gravitacional respectivamente. Para una columna de suelo horizontal, la succión del suelo es la única fuerza que mueve el agua hacia la columna, y la ecuación de Philip se reduce a:

$$F(t) = St^{1/2}. \quad (2.5)$$

Green y Ampt (1911) propusieron el esquema simplificado para infiltración que se muestra en la Figura 2-4. El frente mojado es una frontera brusca que divide el suelo en contenido de humedad θ_i debajo del suelo saturado con contenido de humedad η arriba. El frente mojado ha penetrado hasta una profundidad L desde el momento t en que la infiltración empieza. El agua se encharca en la superficie hasta una pequeña profundidad h_0 .

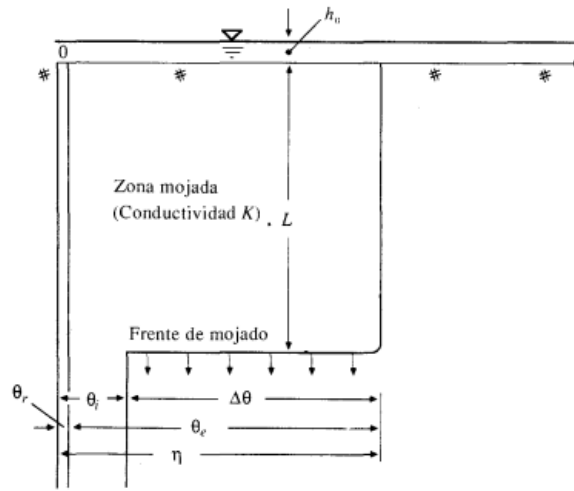


Figura 2-4. Variables en el modelo de infiltración de Green-Ampt

Considerando una columna vertical de suelo de sección transversal horizontal de área unitaria y un volumen de control definido alrededor del suelo mojado entre la superficie y la profundidad L , se tiene que si el suelo tenía un contenido de humedad inicial de θ_i a través de toda su longitud, la cantidad de humedad aumenta desde un punto base hasta igualar la porosidad (η) a medida que el frente de agua atraviesa. El contenido de humedad θ es la relación entre la masa de agua y el volumen total dentro la superficie de la superficie de control, luego el incremento de agua almacenada dentro del volumen de control como resultado de la infiltración es $L(\eta - \theta_i)$ para la sección transversal unitaria. Así, esta cantidad es igual a F , la profundidad acumulada de agua infiltrada en el suelo:

$$\begin{aligned} F(t) &= L(\eta - \theta_i) \\ &= L\Delta\theta \end{aligned} \quad (2.6)$$

La ley de Darcy puede expresarse como

$$q = -K \frac{dh}{dz} \quad (2.7)$$

En este caso el campo de flujo de Darcy q es constante a través de toda la profundidad y es igual a $-f$, debido a que q es positivo hacia arriba y f es positivo hacia abajo. Si se consideran 2 puntos localizados, uno en la superficie del terreno y otro justo en el lado seco del frente mojado y, además, suponiendo que la cabeza de presión de la superficie es igual a la profundidad de encharcamiento h_0 y que el segundo punto es igual a $-\psi - L$, la ley de Darcy para este sistema queda como:

$$f = K \left[\frac{\psi + L}{L} \right] \quad (2.8)$$

Si la profundidad de encharcamiento h_0 es muy pequeña comparada con ψ y L , lo que usualmente es apropiado para describir problemas de hidrología de aguas superficiales en que el agua encharcada se vuelve escorrentía superficial, se tiene de la ecuación (2.7) que la profundidad del frente de mojado es $L = F/\Delta\theta$, y suponiendo $h_0 = 0$, la sustitución en (2.8) resulta en:

$$f = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (2.9)$$

dado que $f = dF/dt$, la (2.9) se puede expresar como una ecuación diferencial con una incógnita F :

$$\frac{dF}{dt} = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (2.10)$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene la ecuación de Green-Ampt para infiltración acumulada:

$$F(t) - \psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right) = Kt \quad (2.11)$$

Una vez que la profundidad acumulada de agua infiltrada, F , ha sido calculada con la fórmula (2.11), la tasa de infiltración f se puede obtener de la ecuación (2.9). En este caso ese valor corresponderá a la cantidad de precipitación acumulada e infiltrada para un periodo de tiempo. Pudiendo también utilizar

$$f(t) = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (2.12)$$

La aplicación del modelo de Green-Ampt requiere estimaciones de la conductividad hidráulica K , de la porosidad η y de la altura de succión de suelo en el frente de mojado ψ . La variación de la altura de succión y de la conductividad hidráulica en base con el contenido de humedad θ fue estudiada por Brook y Corey (1964) de donde se formularon ecuaciones. De esa forma utilizando la ecuación de Brooks-Corey, Rawls, Brakensiek y Miller (1983) usaron este método para analizar una gran cantidad de suelos y determinaron así valores promedio de los parámetros de Green-Ampt η , θ_e , ψ y K como se muestra en la

Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varias clases de suelos. Rawls, Brakensiek y Miller (1983)

Clase de suelo	Porosidad (η)	Porosidad efectiva (θ_e)	Cabeza de succión (ψ) [cm]	Conductividad hidráulica (K) [cm/h]
Arena	0.437 (0.374–0.500)	0.417 (0.354–0.480)	4.95 (0.97–25.36)	11.78
Arena margosa	0.437 (0.363–0.506)	0.401 (0.329–0.473)	6.13 (1.35–27.94)	2.99
Marga arenosa	0.453 (0.351–0.555)	0.412 (0.283–0.541)	11.01 (2.67–45.47)	1.09
Marga	0.463 (0.375–0.551)	0.434 (0.334–0.534)	8.89 (1.33–59.38)	0.34
Marga limosa	0.501 (0.420–0.582)	0.486 (0.394–0.578)	16.68 (2.92–95.39)	0.65
Marga arenoarcillosa	0.398 (0.332–0.464)	0.330 (0.235–0.425)	21.85 (4.42–108.0)	0.15
Marga arcillosa	0.464 (0.409–0.519)	0.309 (0.279–0.501)	20.88 (4.79–91.10)	0.1
Marga limo-arcillosa	0.471 (0.418–0.524)	0.432 (0.347–0.517)	27.3 (5.67–131.50)	0.1
Arcilla arenosa	0.43 (0.370–0.490)	0.321 (0.207–0.435)	23.90 (4.08–140.2)	0.06
Arcilla limosa	0.479 (0.425–0.533)	0.423 (0.334–0.512)	29.22 (6.13–139.4)	0.05
Arcilla	0.475 (0.427–0.523)	0.385 (0.269–0.501)	31.63 (6.39–156.5)	0.03

A medida que el suelo se vuelve más fino cuando pasa de arena a arcilla, la altura de succión de suelo del frente mojado se incrementa mientras que la conductividad hidráulica decrece. En la tabla también se muestran los rangos típicos, los cuales no son muy grandes para η y θ_e , pero ψ puede variar en un amplio rango para un suelo dado.

Bouraoui et al. (1996) y Ogden y Saghafian (1997) establecieron modelos modificados de Green-Ampt para simular correctamente tormentas con intensidades fluctuantes o intervalos de pausa, capaces de modelar la recuperación de la capacidad de infiltración mediante la desecación del frente húmedo. Ogden y Saghafian (1997) desarrollaron la técnica conocida como *Green and Amp with Redistribution (GAR)*, cuyo enfoque permite que el frente mojado avance y reduzca su saturación media durante los periodos sin lluvia. A su vez Bouraoui y Dillaha (1996) introdujeron el modelo *Modified Green-Ampt (MGA)*, el que sustituye la dependencia temporal por un balance de almacenamiento de agua en el suelo (S'_t), simulando la recuperación mediante el drenaje gravitacional cuando la humedad supera la capacidad de campo. A pesar de que Shao et al. (2016) validaron el método mediante ensayos, destacando que su mecanismo de control de drenaje evita la sobreestimación de la recuperación de la tasa de infiltración, su implementación rigurosa dificulta la selección y calibración de parámetros hidrodinámicos específicos para cuencas con escasa disponibilidad de datos *in-situ*.

Propuesto por el Soil Conservation Service de EE. UU. (1972), el método de la curva número es un modelo simplificado que se basa en caracterizar la cuenca para así cuantificar tanto la infiltración como la escorrentía en base a los factores obtenidos como a la precipitación caída. Definiendo como I_0 la abstracción inicial hasta antes del punto de encharcamiento y como F la abstracción o infiltración ocurrida a continuación de dicho punto, este método, postula la igualdad existente del cociente entre la infiltración F y el potencial máximo de infiltración S del suelo, respecto al cociente entre la precipitación efectiva o escorrentía directa expresada como lámina de agua P_{ef} y la precipitación efectiva máxima posible ($P - I_0$), es decir:

$$\frac{F}{S} = \frac{P_{ef}}{P - I_0} \quad (2.13)$$

Por continuidad se cumple que

$$P = P_{ef} + F + I_0 \quad (2.14)$$

Y eliminando F entre las dos relaciones anteriores, resulta:

$$P_{ef} = \frac{(P - I_0)^2}{(P + S - I_0)} \text{ [mm]} \quad (2.15)$$

donde P es la precipitación total de la tormenta y S , el déficit potencial máximo de escorrentía es evaluado a su vez mediante la relación,

$$S = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ [mm]} \quad (2.16)$$

donde CN es un índice de las características geológicas, morfológicas y de uso de los suelos de la cuenca, además de sus condiciones iniciales de humedad, llamado “Curva Número”, que varía entre límites $CN = 0$ para una cuenca donde todo lo que llueve se infiltra, hasta $CN = 100$ para una cuenca absolutamente impermeable, donde todo lo que llueve escurre. Valores típicos de CN oscilan entre 40 y 80 y se encuentran tabulados para distintos tipos de suelo, y también pueden ser estimados a partir de las características geológicas y de uso de los suelos y del contenido de agua inicial. A partir de datos experimentales, el U.S Soil Conservation Service (USCS) propone la relación

$$I_0 \approx 0.2S \quad (2.17)$$

donde la fórmula en definitiva resulta en (2.18).

$$P_{ef} = \begin{cases} \left[\frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \right] \text{ mm} & ; \quad si \ P \geq 0.2S \\ 0 & ; \quad si \ P < 0.2S \end{cases} \quad (2.18)$$

Lo que permite estimar la precipitación efectiva o escorrentía directa en función de la precipitación total de la tormenta y del número de curva de la cuenca. El método es válido sólo para cuencas homogéneas, en el que el valor de S es único. En la realidad, difícilmente existirían cuencas que sean

totalmente homogéneas y más aún en el caso de cuencas semi urbanizadas, con distinto valor de Curva Número en diferentes sectores. En dichos casos se ha propuesto el uso de una Curva Número promedio evaluada como el promedio ponderado de los distintos valores sectoriales de la Curva Número, es decir,

$$\overline{CN} = \frac{\sum A_i \cdot CN_i}{A_T} \quad (2.19)$$

donde A_i y CN_i son el tamaño de cada subsector y su correspondiente Curva Número y A_T es el área total de la cuenca.

Para diversas condiciones de humedad la curva número se modifica, a partir de sus condiciones normales, en base a tablas o a las siguientes relaciones (Chow et al, 1994):

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(II)}{10 - 0.058 \cdot CN(II)}; \text{ Para condiciones antecedentes de humedad seca}$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)}; \text{ Para condiciones antecedentes húmedas}$$

Las condiciones antecedentes de humedad se clasifican en tres grupos en base a la lluvia antecedente total de 5 días, de acuerdo con los siguientes criterios:

Tabla 2-2. Condiciones antecedentes de humedad (Chow et al 1994)

Lluvia total antecedente de 5 días [mm]			
Estación			
Grupo	Tipo	Inactiva	De crecimiento
I	Seca	Menor a 12.7	Menor a 35.6
II	Normal	12.7 a 28	35.6 a 53.5
III	Húmeda	Sobre 28	Sobre 53.5

Se tiene que, para una precipitación dada, la escorrentía directa está asociada a la capacidad de infiltración que presente la cuenca en el momento de la tormenta (S), la cual, está relacionada con las

condiciones antecedentes de humedad (CAH). Por lo que parece adecuado pensar que la infiltración de una cuenca se puede evaluar como una variable que sea función de esas condiciones antecedentes, definida como la cantidad total de precipitación caída en la estación meteorológica durante los cinco días anteriores a un evento de precipitación.

2.4. Escorrentía

El ciclo de escorrentía es la fase del ciclo hidrológica que ocurre sobre la litósfera, y es en definitiva el más importante en términos de la evaluación de los recursos hídricos de una cuenca.

La primera precipitación caída, es interceptada por la capa de vegetación que cubre el suelo, que normalmente es devuelta a la atmósfera como evaporación y transpiración vegetal. La lluvia que sobrepasa interceptación llega a la superficie del suelo donde es detenida en zonas de depresión y/o es infiltrada al interior del suelo.

A medida que la precipitación continúa, la capacidad de retención se colmata, la infiltración, al humedecerse el suelo, disminuye, hasta que se produce una precipitación en exceso que genera escorrentía superficial, que comienza a escurrir inicialmente en forma de una lámina superficial, para posteriormente irse encontrando a través de la red de drenaje natural de la cuenca para formar cauces de esteros y ríos.

Horton (1933) describió el flujo superficial de la siguiente manera: “Despreciando la interceptación de la vegetación, la escorrentía superficial es aquella parte de la lluvia que no es absorbida por el suelo mediante infiltración. Si el suelo tiene una capacidad de infiltración f que se expresa en pulgadas absorbidas por hora, entonces cuando la intensidad de la lluvia i es menor que f , la lluvia es absorbida completamente y no existe la escorrentía superficial. Se puede decir como una primera aproximación que si i es mayor que f , la escorrentía superficial ocurrirá a una tasa de $(i - f)$ ”

A esta diferencia $(i - f)$ Horton le dio el nombre de “exceso de lluvia”. Horton consideró que la escorrentía superficial tomaba la forma de un flujo en lámina cuya profundidad podía medirse en fracciones de longitud. A medida que el flujo se acumulaba moviéndose a lo largo de la pendiente, su

profundidad aumentaba hasta que descargaba en un canal. Con el flujo superficial existe un almacenamiento en depresiones en los hundimientos de la superficie y un almacenamiento por detención superficial proporcional a la profundidad del mismo flujo superficial. El suelo almacena el agua infiltrada y luego la libera lentamente como flujo subsuperficial para entrar en la corriente como flujo base durante los periodos secos.

Se debe tener en consideración que el flujo superficial es aplicable a superficies impermeables en áreas urbanas y a superficies naturales con capas delgadas de suelo y con baja capacidad de infiltración como ocurre en tierras semiáridas y áridas.

2.5. Conclusión

Se presentaron los fundamentos de los procesos que controlan el balance hídrico en una cuenca, principalmente la precipitación, la infiltración y la escorrentía analizando los métodos tanto empíricos como teóricos que existen para cuantificarlos.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Introducción

Se presenta la zona de estudio en la cual se llevaron a cabo los ensayos de infiltración, los materiales utilizados y la metodología de cálculo para analizar la infiltración y escorrentía de la cuenca.

3.2. Área de estudio

El presente estudio se enfoca en conocer la variabilidad de la infiltración dentro de la cuenca del río Carampangue, localizada en la comuna de Arauco, región del Bío-Bío, entre los 37° 06' Sur y los 72° 58' Oeste. La cuenca es exorreica que desemboca en el Golfo de Arauco, drenando una superficie aproximada de 1260 km². Se muestra en la Figura 3-1.

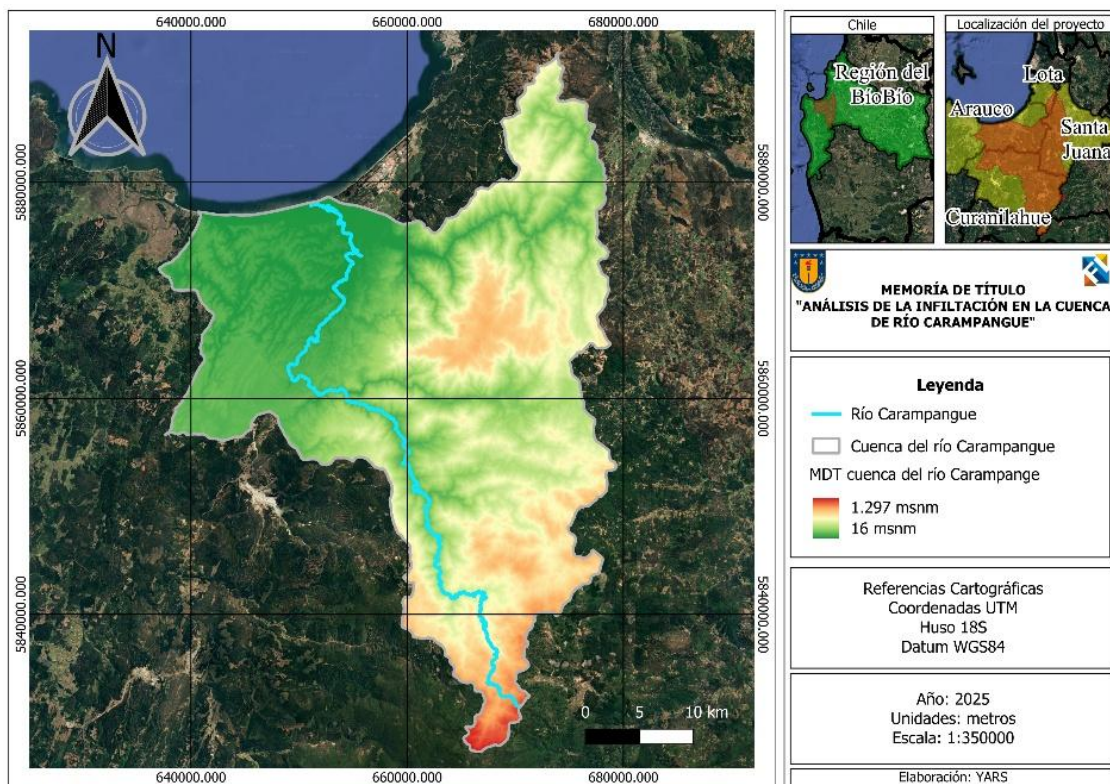


Figura 3-1. Ubicación y elevaciones del área de estudio

El río Carampangue se alimenta de los afluentes de los ríos Cifuentes, Cabrera y Nahuelán, mientras que en la parte inferior recibe el aporte del estero Los Patos y del río Lía. Según la clasificación de Köppen, la cuenca Río Carampangue se encuentra en la zona de clima mediterráneo de lluvia invernal (Csb) y clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera (Csb i). Estas zonas se caracterizan por tener un umbral térmico definido por una temperatura media del mes más frío inferior a 18°C y superior a -3°C, con un fuerte comportamiento estacional de las precipitaciones, las cuales, sin embargo, están presentes durante todo el año y por una vegetación asociada al bosque templado y matorral.

De acuerdo con geología realizada por SERNAGEOMIN (2003) la cuenca del río Carampangue está constituida principalmente por rocas metamórficas e intrusivas, las cuales se ubican desde el centro a la parte alta de la zona de estudio. Las unidades que están presentes en la cuenca en un sentido de cordillera hacia el mar son:

- CPg: Cuerpo intrusivo plutónico del periodo carbonífero pérmico formado por granitos, granodionitas, tonalitas y dioritas.
- Tr1c: Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres del Triásico, compuestas por conglomerado, brecha, arenisca y lutita.
- Pz4b: Rocas metamórficas, pertenecientes a la formación del Silúrico-Carbonífero de la era Paleozoica, compuestas por rocas metamórficas tales como pizarras, filitas y metaareniscas.
- PE1: Unidad sedimentaria marina transicional, perteneciente a la formación del Paleoceno-Eoceno correspondientes a las formaciones Curanilahue y Boca Lebu, en la cual se distinguen areniscas, limolitas calcáreas y mantos carbón.
- P1m: Unidad sedimentaria de origen marino del Pérmico, correspondiente a turbiditas.
- M1m: Rocas sedimentarias marinas transgresivas y plataformales de la época del Mioceno. Pertenecientes a las Formaciones Ranquil y Cholchol. Formada por rocas tales como areniscas, arcillolitas y limolitas.
- Qm: Depósitos litorales de playas actuales pertenecientes a la formación del Pleistoceno-Holoceno. Formados por arenas y gravas.

La Figura 3-2 muestra la distribución geológica al interior de la cuenca.

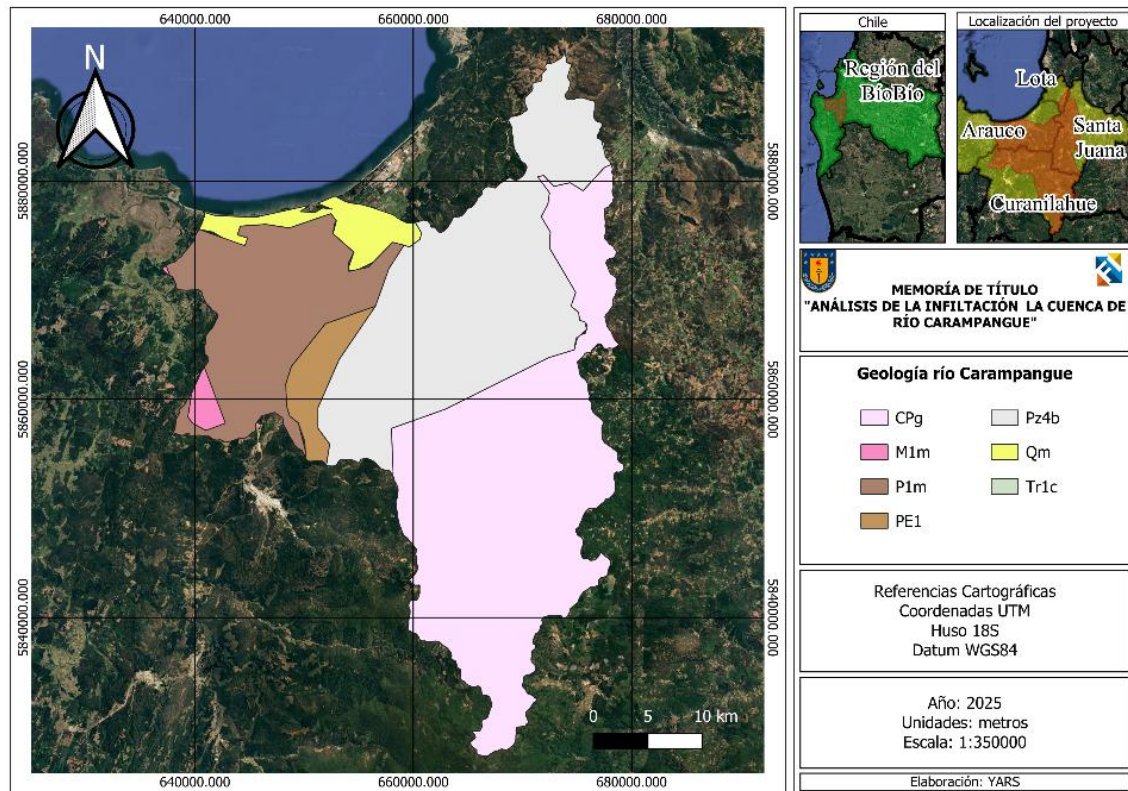


Figura 3-2. Geología en la cuenca del río Carampangue. (Sernageomin, 2003)

Los tipos de suelo de la cuenca Río Carampangue, corresponden a suelos de tipo graníticos de la costa, como alfisoles-inceptisoles (SERNAGEOMIN, 2003). Los alfisoles son suelos donde predomina el aluminio Al y hierro Fe, presentan un buen desarrollo del perfil y un moderado grado de alteración, por lo que son suelos destinados a diversos usos agrícolas, pastoriles y forestales. Por otra parte, los inceptisoles son suelos inmaduros que tienen un perfil con rasgos menos expresados que los suelos maduros y que guardan todavía relación con la naturaleza del material original.

De acuerdo con la información recabada en el informe de uso de suelo en año 2015 por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) en la Región del Biobío la cuenca presenta 7 diferentes grandes tipos de utilización de este, donde predominan de manera general las plantaciones de bosques planificadas, así como nativo, la segunda mayor influencia dentro de la cuenca viene dado por áreas urbanas e industriales, seguido de zonas de humedales, donde con un poco menos de área continua los terrenos agrícolas. Lo que se puede ver en la Figura 3-3.

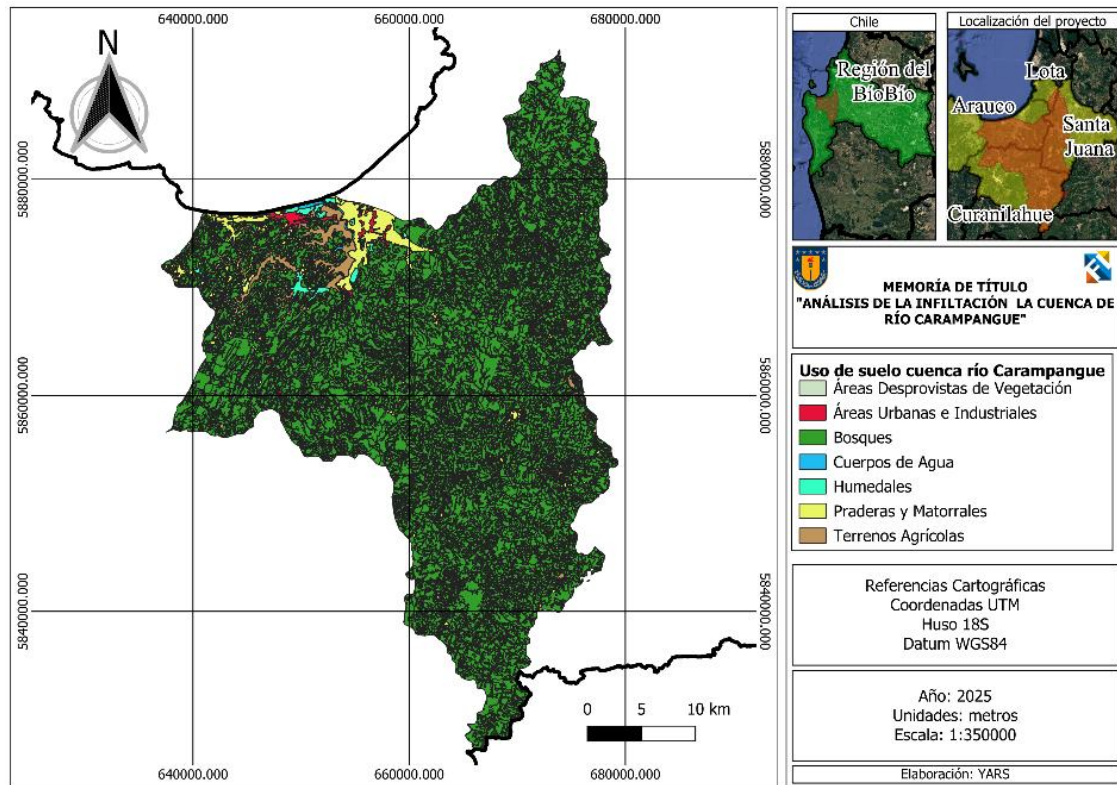


Figura 3-3. Uso de suelo cuenca del río Carampangue

3.2.1. Precipitación

La precipitación se analizó sobre la base de medición en 18 estaciones meteorológicas ubicadas en o alrededor de la cuenca de estudio como se muestra en la Figura 3-4.

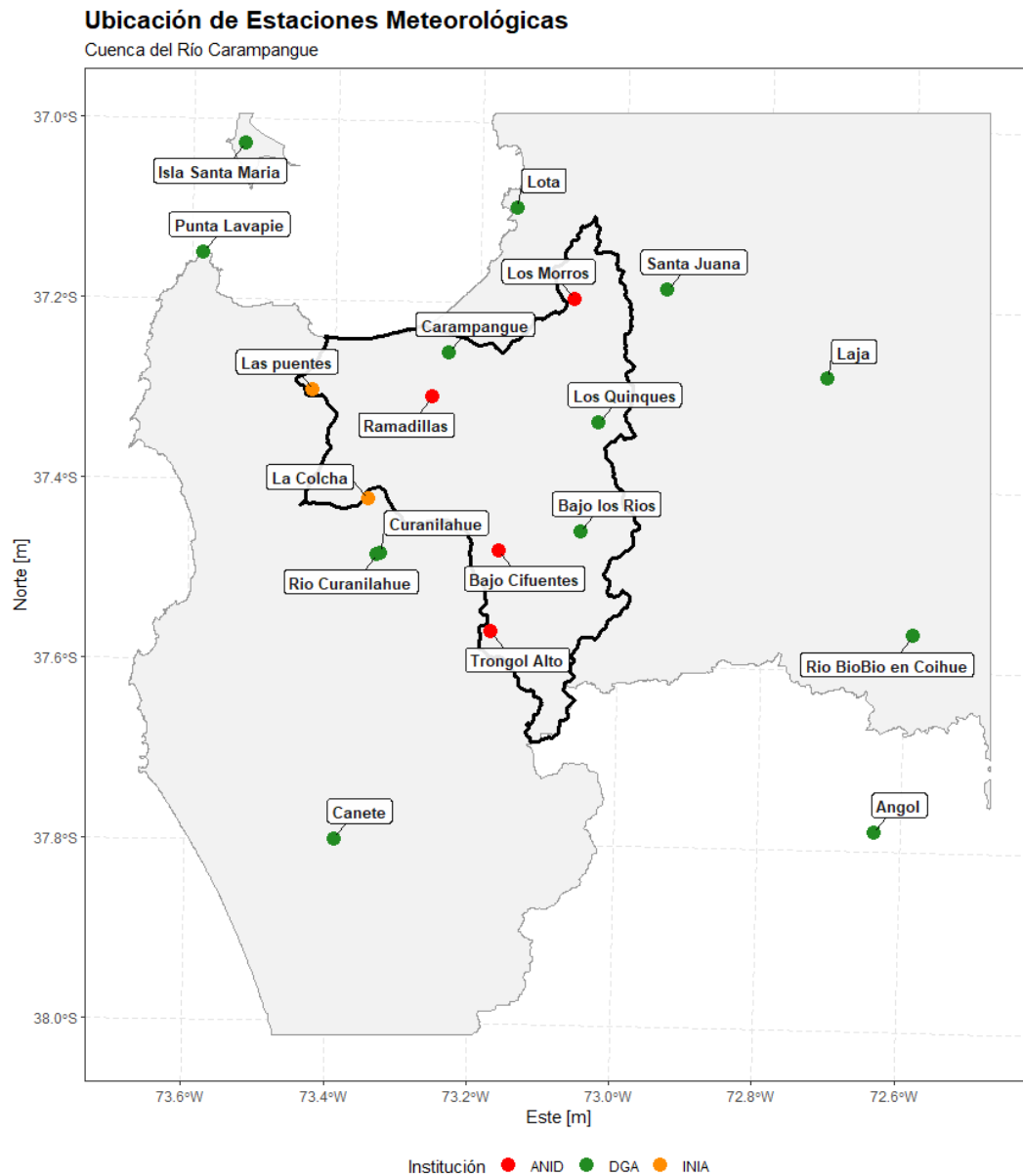


Figura 3-4. Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas

Las estaciones tienen distinta frecuencia de medición. La estación “Ramadillas” toma datos cada 15 minutos; “Los Morros”, “Bajo Cifuentes” y “Alto Trongol” registran precipitación cada 5 minutos; Las estaciones INIA registran precipitación cada una hora y las estaciones DGA en línea registran datos para el período de 30 minutos. Por ello la información se agregó para generar una base de datos cada 30 minutos. La Tabla 3-1 muestra la disponibilidad de datos de precipitación en las distintas estaciones.

Tabla 3-1. Disponibilidad de datos de estaciones meteorológicas para tormentas estudiadas

Estación	Propiedad	29-03-2025	22-04-2025	14-06-2025	30-07-2025
Bajo Cifuentes	ANID	✓	✓	✓	✓
Trongol Alto	ANID	✓	✓	✓	✓
Ramadillas	ANID	x	x	x	x
Los Morros	ANID	✓	x	x	✓
La Colcha	INIA	✓	✓	✓	x
Las Puentes	INIA	✓	✓	✓	✓
Curanilahue	DGA	x	✓	✓	✓
Carampangue	DGA	✓	✓	✓	✓
Santa Juana	DGA	✓	✓	✓	✓
Los Quinques	DGA	✓	✓	x	✓
Bajo los Rios	DGA	✓	✓	✓	✓
Isla Santa Maria	DGA	✓	✓	✓	✓
Punta Lavapie	DGA	✓	✓	✓	✓
Lota	DGA	✓	✓	✓	✓
Laja	DGA	✓	✓	✓	✓
Rio BioBio en Coihue	DGA	✓	✓	✓	✓
Canete	DGA	✓	✓	✓	✓
Angol	DGA	✓	✓	✓	✓
Rio Curanilahue	DGA	x	x	x	✓

Un caso de inconsistencia se encontró en la estación Ramadillas que se atribuye a errores de medición: en el año 2023 llovieron 2676 mm mientras que estaciones cercanas como “Las Puentes” en Arauco registraron 1694 mm, es decir, una discrepancia cercana a 58%. La estación DGA “Carampangue” ubicada a unos 5 kilómetros de distancia registró 825.3 mm de precipitación anual con un 224% de diferencia. La Figura 3-5 muestra la curva de doble masa acumulada.

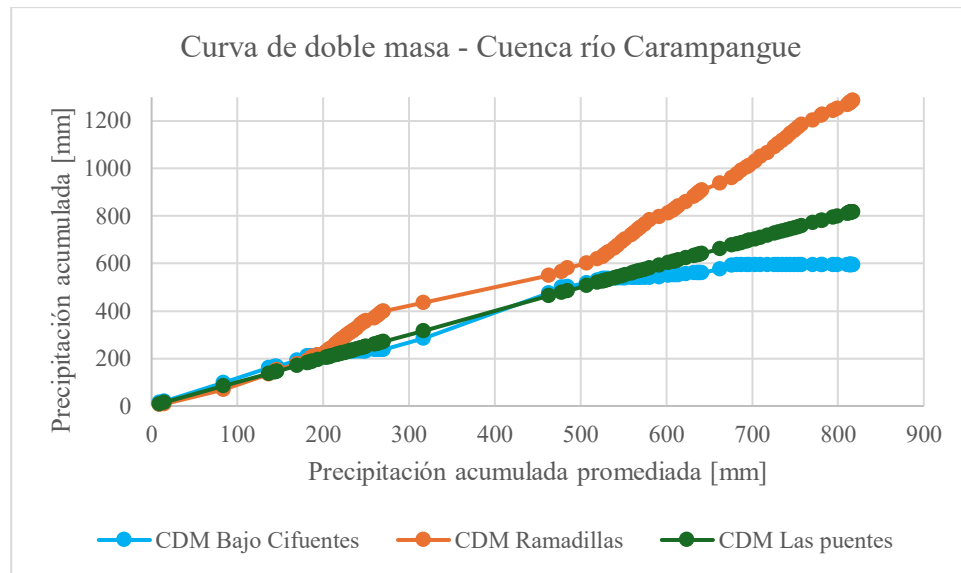


Figura 3-5. Curva de doble masa estación Ramadillas periodo junio-octubre 2024

Se observa un quiebre de pendiente en la estación Ramadillas, por lo que se descarta.

La Tabla 3-2 muestra la forma en la que los datos son organizados para que la utilización de estos en los códigos creados.

Tabla 3-2. Tabla tipo de ingreso de datos al archivo .CSV para su posterior lectura

Estaciones	X (W)	Y (N)	Propiedad	29-03-2025 14:00	29-03-2025 15:00
La Colcha	646004	5857256	INIA	1.3	7.6
Las puentes	639146	5870691	INIA	0.6	8.4
Trongol Alto	661057	5840863	ANID	0	0.6
Bajo Cifuentes	661963	5850839	ANID	0	0
Los Morros	671334	5881826	ANID	0	0
Ramadillas	653859	5869791	ANID	1	1
Isla Santa Maria	630930	5901119	DGA	0	0
Punta Lavapie	625658	5887661	DGA	0	0
Santa Juana	682789	5882958	DGA	0	0
Lota	664319	5892989	DGA	0	0
Carampangue	655867	5875292	DGA	0	0
Laja	702496	5871953	DGA	0	0
Los Quinques	674258	5866611	DGA	0	0
Bajo los Rios	672036	5853183	DGA	0	0.1
Rio BioBio en Coihue	712954	5840269	DGA	0	0
Canete	641657	5815377	DGA	0	0
Angol	708100	5816075	DGA	0	0

Como se puede ver entonces en la Tabla 3-2 es que las estaciones están georreferenciadas y mencionando la propiedad a la que corresponden para obtener una mayor facilidad de discretizar en el mapa.

Para obtener la distribución espacial de la precipitación, los datos medidos en las estaciones se interpolaron mediante IDW (*Inverse Distance Weighted*) o método de ponderación de la distancia inversa que es una herramienta geoestadística de interpolación, basado en la idea de que los puntos de datos más cercano al punto de interpolación poseen mayor influencia que aquellos que se encuentran más lejanos. Shepard (1968) planteó la siguiente fórmula para la estimación de estos valores:

$$u(x) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n w_i(x) \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n w_i(x)}, & \text{sí } d(x, x_i) \neq 0 \text{ para todo } i. \\ u_i, & \text{sí } d(x, x_i) = 0 \text{ para algún } i. \end{cases} \quad (3.1)$$

donde $w_i(x) = 1/d(x, x_i)^p$, $w_i(x)$ es una función de ponderación simple del IDW, $d(x, x_i)$ es la función de distancia desde los puntos desconocidos x hasta el punto conocido x_i con el parámetro de potencia positivo p , y N es el número de puntos conocidos incluidos en el cálculo.

La selección de método de interpolación fue IDW por la simplicidad de su uso y sus buenos resultados en investigaciones similares como Borges et al. (2016) que concluyeron que métodos simples obtienen buenos resultados que pueden mejorarse con la introducción de atributos como la altitud.

Utilizando el lenguaje R se crearon intervalos discretos para mejorar la presentación de los datos que se muestran en paralelo con su precipitación acumulada, esto con el fin de determinar las zonas con mayor precipitación dentro de la cuenca y para tener un punto de comparación con la infiltración espacial dentro de la misma.

3.2.2. Suelo

Definidas las zonas de muestreo se obtuvieron muestras de suelo. Se realizó el estudio de los mismos mediante una extracción aleatoria con una profundidad cercana a los 30 centímetros.

Se realizó ensayos granulométricos a partir de tamices normados, de los cuales se obtuvieron los distintos tamaños de partículas y sus porcentajes dentro del total de la muestra. Para las partículas de suelo sobre el tamiz número 200 (0.075 mm) se estimó la distribución mediante el tamizado mecánico y en las partículas de diámetro inferior se realizaron ensayos de cono de penetración dinámica (CPT) para determinar el tipo de fino correspondiente al suelo.

De los ensayos de tamizado se obtuvieron las gráficas que ejemplifican de mejor manera la representación granulométrica. Utilizando criterios asociados a dichas gráficas, se calcularon los diámetros característicos $D_{60,30,10}$, contando con la información suficiente para conocer los tamaños y cantidad de partículas presentes. Estos diámetros indican el tamaño grano por debajo del cual se encuentra un porcentaje específico del material, en donde Hazen (1904) definió al D_{10} como el tamaño efectivo. Si se cuentan con los puntos suficientes para la realización de una buena gráfica, se debe preferir este tipo de análisis. Hazen (1904) además propuso dos coeficientes que a partir de los diámetros específicos entregan información acerca de que tan uniforme o bien graduada es la muestra de suelo que se está analizando. Dichos parámetros tienen como nombre, coeficiente de uniformidad en (3.2) y de curvatura en (3.3).

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad (3.2)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (3.3)$$

Hazen propuso que suelos con $C_u < 2$, estos serán muy uniformes y para un suelo con $1 < C_c < 3$, estos serán bien graduados.

Clasificación de suelos

La clasificación de los suelos se realizó de acuerdo con la norma ASTM D2487 donde se estandariza el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). Sistema propuesto por Casagrande (1942) donde clasifica los suelos en tres grandes grupos: suelos granulares, suelos finos y suelos de composición orgánica. Los criterios utilizados de acuerdo con el USCS se muestran en la Figura A 3.2.1, donde las distintas características permiten establecer los símbolos y grupos a los cuales pertenecen los distintos tipos de suelos estudiados.

Tras la realización de los ensayos de tamizado mecánico, se recolectó la cantidad de suelo que posee un tamaño de grano inferior a 0.075 mm, conociendo de esta forma la porción fina existente dentro de la muestra de suelo. Dado que la porción fina posee relevancia para los procesos de infiltración, se dictaminó necesario analizar qué tipo de finos contenía cada muestra.

Para determinar el tipo de fino presente dentro de la muestra de suelo se hizo uso de una máquina de cono de penetración dinámica para así conocer los límites de Atterberg y discernir con total certeza el tipo de suelo presente en la muestra. Como se muestra en la Figura 3-6.



Figura 3-6. Máquina de penetración dinámica en laboratorio de suelos, Facultad de Ingeniería.

Una vez obtenidas las muestras son llevadas al laboratorio, donde son secadas mediante el uso de un horno para posteriormente proceder a realizar la granulometría que se lleva a cabo mediante horno.

La primera instancia de caracterización de las muestras fue realizar el tamizado de estas a través de 18 tamices que van desde el N°4 al N°200. La información registrada tratada mediante el *software* Microsoft Excel donde se obtienen los datos necesarios para la clasificación. Dicha labor se llevó a cabo en el laboratorio de hidráulica del departamento de Ingeniería Civil, en la Universidad de Concepción. Los materiales utilizados consistieron en tamices, tablas de anotación y una balanza con precisión ± 1 gramo. Un ejemplo de la caracterización de suelos en laboratorio se puede apreciar en la Figura A 3.2.2 y Figura A 3.2.3, en donde se exhibe de forma ilustrativa los tamices utilizados y las muestras tras la realización del procedimiento. Es importante remarcar que la diferencia del total de material retenido no debe presentar una diferencia considerable con la masa inicial seca de la muestra para mantener la validez del ensayo.

Así, se obtuvieron las curvas granulométricas correspondientes a cada sitio de muestreo, así como también el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c). La Figura 3-7 enseña las curvas resultantes de los ensayos granulométricos para cada muestra de suelos.

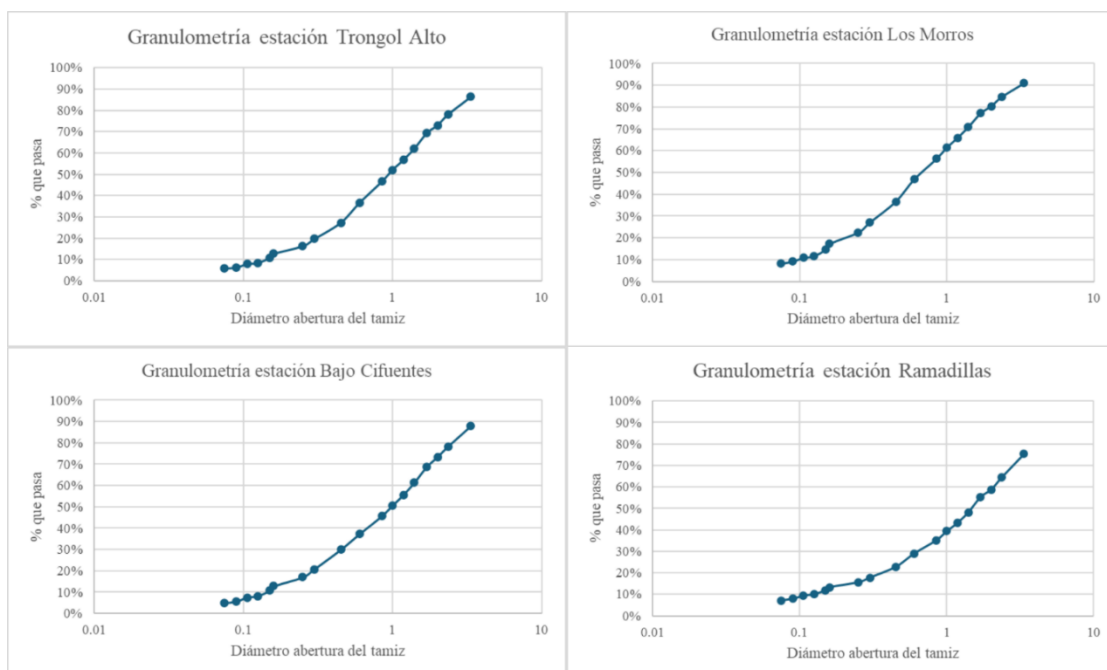


Figura 3-7. Análisis granulometría sitios de estudio

La Tabla 3-3 muestra los diámetros específicos asociados a cada sitio de muestreo, así como también el valor obtenido de los coeficientes de acuerdo con las ecuaciones (3.2) y (3.3).

Tabla 3-3. Diámetros específicos y coeficientes en sitios muestreados.

Estación	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	C_u	C_c
Trongol Alto	0.14	0.49	0.94	1.31	9.28	1.31
Los Morros	0.10	0.35	0.68	0.96	9.76	1.27
Bajo Cifuentes	0.14	0.45	0.98	1.35	9.45	1.06
Ramadillas	0.13	0.64	1.48	2.08	16.66	1.58

Trongol Alto, en la Figura 3-7 arriba a la izquierda se trata de un suelo con bajo porcentaje de finos (5.8%) y se encuentra una pendiente pronunciada que indica la existencia mayoritaria de arenas medias. Además, de acuerdo con los coeficientes calculados se trata de una arena bien graduada. Mientras que el estudio de finos dictaminó que se trataba de un limo de alta plasticidad (SW-SM). En el anexo se adjunta la Tabla A 3.2.1 a modo de resumen del proceso de tamizado.

Los Morros evidencia una curva de arenas de todos los diámetros bien graduadas. En este caso, la presencia de finos aumenta hasta el 8.3%, que con un respectivo ensayo de penetrómetro con cono de caída libre se indica que corresponde a arcilla de alta plasticidad (SW-SC). La tabla resultante de los ensayos se adjunta en la Tabla A 3.2.2.

En Bajo Cifuentes se observó una curva pronunciada, obteniendo un coeficiente de curvatura correspondiente a un suelo bien graduado, y con un porcentaje de finos inferior al 5%, por lo que se el suelo de este sitio es una arena limpia bien graduada (SW). Todos los porcentajes se presentan de mejor manera en la Tabla A 3.2.3 del anexo.

Para Ramadillas la curva granulométrica presenta un final previo al 80%, lo que sugiere la existencia de partículas de diámetro un poco mayor a lo visto. Cuenta con un 7.1% de material fino, el cual tras los ensayos de laboratorio se determinó que se trataba de un limo de alta plasticidad. En base a los

coeficientes el suelo es una arena bien graduada con limo de alta plasticidad (SW-SM). Los resultados de granulometría se ven en la Tabla A 3.2.4.

3.2.3. Infiltración

Pruebas de infiltración

Para la realización de los ensayos se utilizó un anillo metálico de 46 cm de diámetro y 30 cm de altura con una regla metálica anidada, un combo, un bidón de agua de 20 litros, un cronómetro y una libreta.

El proceso de medición se realizó mediante el hincado del infiltrómetro de anillo simple en el suelo donde se vacía el contenido de agua, midiendo este con una regla para cuantificar el descenso. A partir de los datos recabados se obtienen los valores de infiltración acumulada y tasas de infiltración sin corregir para cada zona de estudio. La Figura 3-8 muestra las mediciones realizadas con la prueba de anillo simple. Además, se pueden encontrar imágenes del momento de realización del ensayo, en la Figura A 3.2.4.

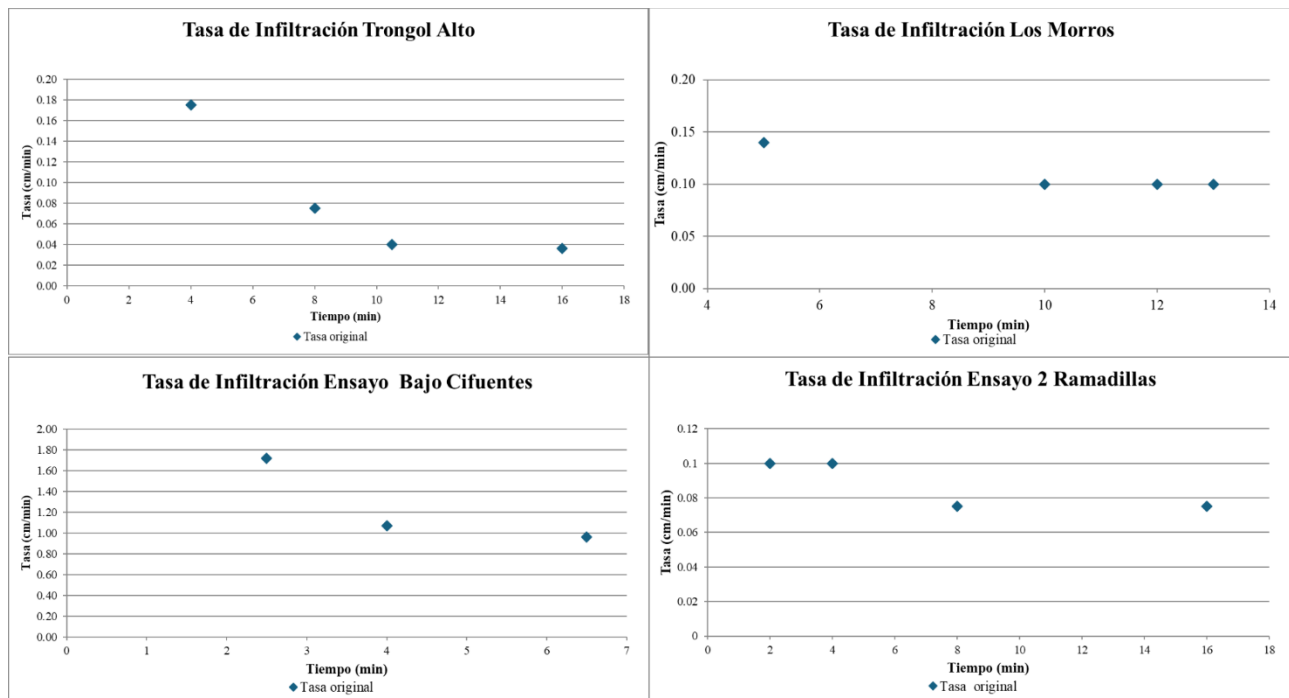


Figura 3-8. Datos de infiltración originales para sitios de estudio

Bouwer (1986) propuso un sistema gráfico para la cuantificación de la sobreestimación de las tasas de infiltración, el cual depende del radio del infiltrómetro y de la cabeza de presión del frente húmedo, la cual depende del tipo de suelo como se muestra en la Figura 3-9.

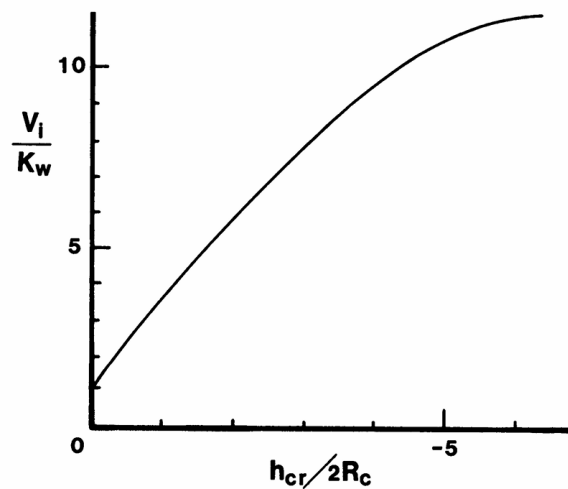


Figura 3-9. Corrección por divergencia lateral para anillo simple. (Bouwer, 1986)

En la Figura 3-9 se puede observar en el eje de las abscisas se muestra la relación “ $h_{cr}/2R_c$ ”, en donde “ h_{cr} ” representa la altura de presión del frente húmedo y “ $2R_c$ ” el diámetro del anillo. Para el eje de las ordenadas se muestra la relación “ V_i/K_w ”, la cual representa una proporción entre la tasa de infiltración final y la conductividad hidráulica del suelo, o simplemente el gradiente hidráulico presente en la infiltración.

Para radios muy grandes la relación “ V_i/K_w ” es igual a uno. Lo cual tiene sentido al pensar que la prueba de infiltración intenta simular la inundación de un área muy amplia. Así el error asociado a la medición del infiltrómetro será despreciable para radios de anillo grandes (Bouwer 1986), lo cual permite que los flujos divergentes sean muy pequeños y tenga validez la hipótesis de Green-Ampt sobre analizar solo un flujo vertical de infiltración.

Habrà flujo vertical de infiltración sin flujos laterales solo cuando el radio del anillo sea muy grande, lo que trae como consecuencia que la conductividad hidráulica se pueda determinar a partir de la tasa de infiltración final ($V_i = K_w$). Dicho punto durante la infiltración indica que los poros disponibles

para el flujo de agua están siendo saturados, permitiendo que la tasa de infiltración tienda a un valor constante.

Bouwer (1999) profundizó en el tema y estandarizó los valores de altura de presión de acuerdo con el tipo de suelo. De la Tabla 3-4 se pueden extraer dichos valores necesarios para realizar el cálculo de la corrección.

Tabla 3-4. Altura de presión en el frente húmedo para tipos de suelo (Bouwer, 1999)

Texturas	Altura de presión (cm)
Arenas gruesas	-5
Arenas medias	-10
Arenas finas	-15
Arenas limosas	-20
Franco Arenoso	-25
Franco Limoso	-35
Arcillas estructuradas	-30
Arcillas no estructuradas	-100

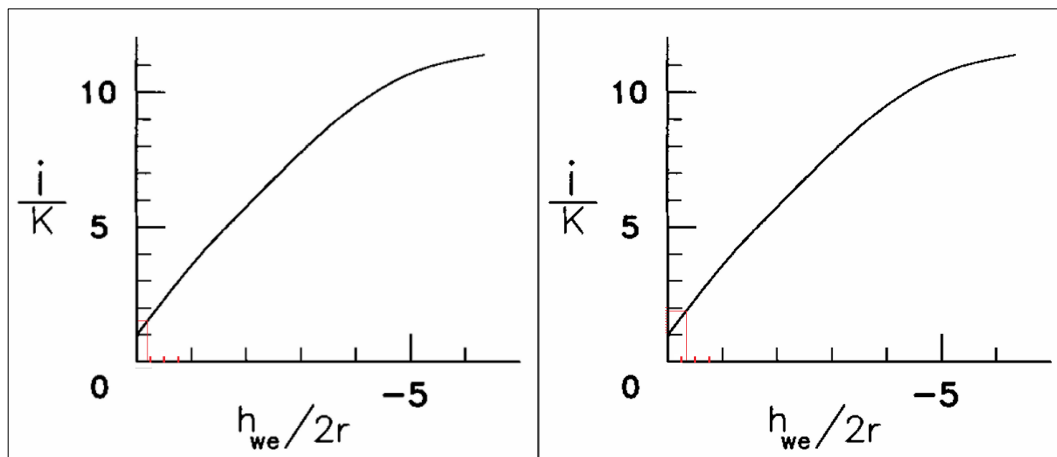


Figura 3-10. Corrección de infiltración. (Bouwer 1999). Izquierda: Corrección arena media. Derecha: Corrección arena fina

Como se logra ver en las líneas rojas de los gráficos en la Figura 3-10, el factor aproximado para una arena media es de 1.5 veces. Mientras que a la derecha se aprecia como la corrección aumenta un poco hasta alrededor de 1.9. De acuerdo con la Tabla 3-3 la única estación con granulometría de mayor diámetro es Ramadillas, por lo que utilizará el factor más grande.

Ahora los valores de la tasa de infiltración corregida se presentan en la Figura 3-11.

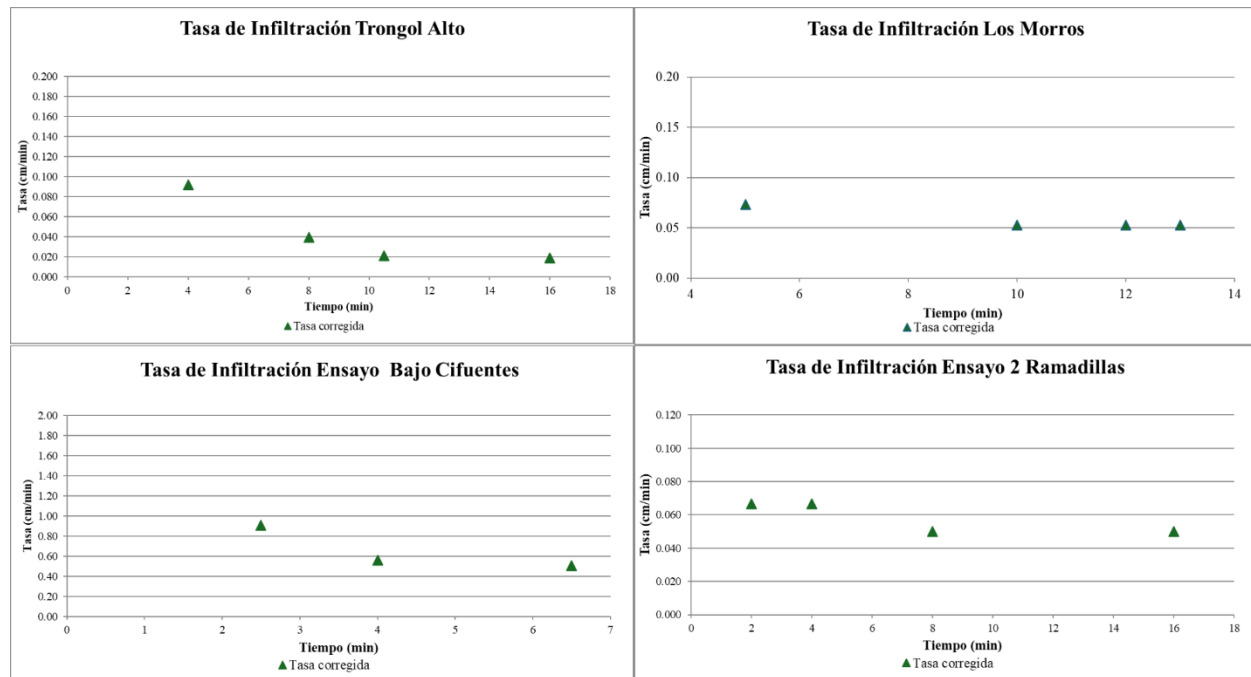


Figura 3-11. Tasas de infiltración corregidas

Trongol Alto posee sin duda el valor de infiltración más bajo, como se ve arriba en la izquierda en la Figura 3-8 y en la Figura 3-11. La tasa original es cercana al 0.04 cm/min y tras aplicar la corrección está disminuye hasta los 0.02 cm/min. A su vez para Los Morros se obtiene una tasa estabilizada corregida aproximada de 0.05 cm/min. Bajo Cifuentes, en cambio, aún tras la corrección alcanza el valor de 0.51 cm/h. Por último, Ramadillas resulta un valor de 0.05 cm/min

Los resultados obtenidos de la corrección de los ensayos son transformados de acuerdo con la unidad de medida de la intensidad de la precipitación y se presentan en la Tabla 3-5:

Tabla 3-5. Resultados de tasa de infiltración corregidas por estación.

Estación	Tasa de infiltración [mm/h]
Trongol Alto	11.48
Los Morros	31.58
Bajo Cifuentes	303.16
Ramadillas	30.00

A la corrección de las curvas medidas se le ajustó la ecuación de Green-Ampt como se muestra en la Figura 3-12.

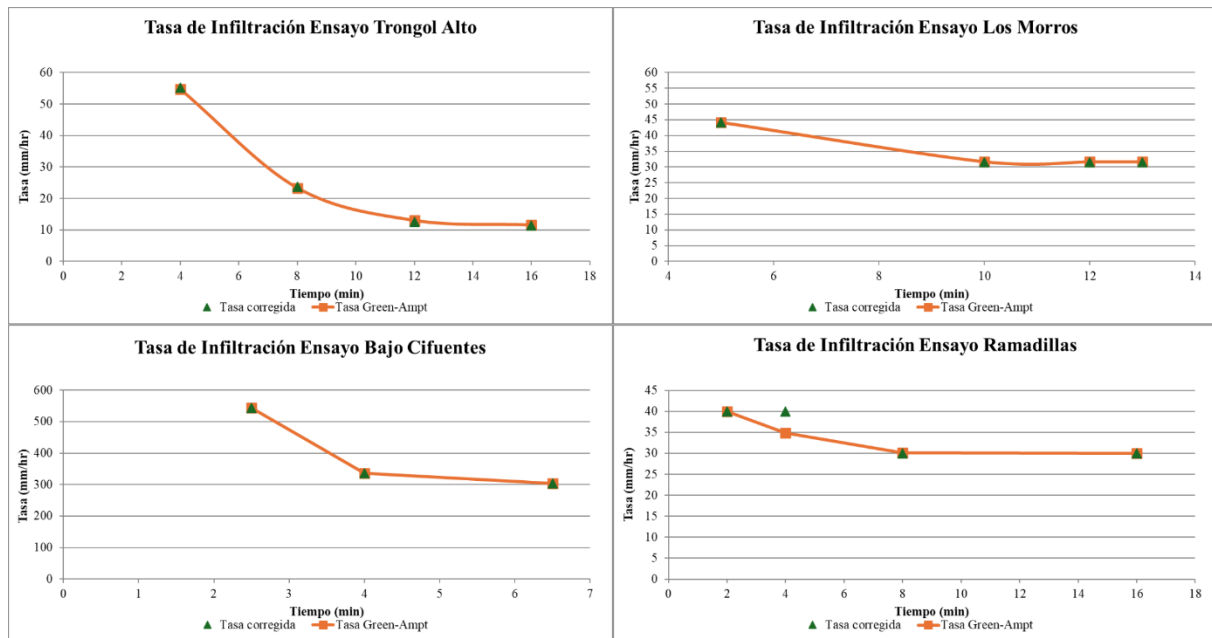


Figura 3-12. Ajustes con ecuación de Green-Ampt a curvas de infiltración corregidas

Usando los valores de referencia de la Tabla 2-1 se buscó el mejor ajuste posible a los puntos de infiltración corregidos con la curva empírica de Green-Ampt. En base a la geología de cada tipo de suelo y los rangos en los que oscilan los valores característicos, se buscan las variables utilizadas dentro de la ecuación (2.12) que generen el menor error asociado al crear una curva teórica que una los puntos. Dichos valores calibrados de manera iterativa se exhiben en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Parámetros de Green-Ampt calibrados por zona.

	Trongol Alto	Los Morros	Bajo Cifuentes	Ramadillas
Altura de succión (ψ) [mm]	40	61.3	20	27
Parámetro de Brooks & Corey (λ)	0.4	0.35	0.5	0.4

En la Figura 3-12 se aprecia de mejor manera el ajuste de la ecuación de Green-Ampt original con respecto a los puntos de infiltración corregidos y los valores calibrados de la Tabla 3-6.

3.3. Estimación de la tasa de infiltración

En base al modelo GAR, y la necesidad de representar la recuperación de la tasa de infiltración en periodos de pausa y baja intensidad se implementó una nueva adaptación al método de Green-Ampt. Este enfoque conserva la física de la infiltración para periodos de carga hidráulica, pero simplifica la componente de redistribución mediante una función de recuperación explícita.

El proceso de cálculo comienza definiendo el estado de humedad antecedente (AMC) de acuerdo con la Tabla 2-2, lo que establece el déficit inicial del contenido de humedad inicial ($\Delta\theta$). En cada paso de tiempo (dt), el modelo calcula la capacidad de infiltración potencial (f_p) en función de la infiltración acumulada (F) presente en el sistema, mediante la ecuación (2.12) para cada intervalo, como se muestra:

$$f_p = K_{sat} \left(\frac{\psi \cdot \Delta\theta}{F_t} + 1 \right) \quad (3.4)$$

El algoritmo compara la intensidad de precipitación del intervalo (I) con la infiltración potencial. Si la intensidad supera la capacidad del suelo ($I \geq f_p$), se asume la saturación de la superficie; en este escenario, la infiltración real corresponde a f_p , mientras que el exceso ($I - f_p$) se convierte en escorrentía superficial y el volumen infiltrado se suma al acumulado ($F_{nuevo} = F_t + f_p \cdot \Delta t$). En caso contrario ($I \leq f_p$), todo el volumen precipitado ingresa al suelo ($F_{nuevo} = F_t + I \cdot \Delta t$). Sin embargo, en una subcondición, si la intensidad es inferior a la conductividad hidráulica saturada ($I < K_{sat}$) se activa el mecanismo de recuperación, debido a que se asume que el aporte de agua es insuficiente para mantener el perfil saturado, permite el drenaje de poros. Este volumen de drenaje se cuantifica mediante una función de decaimiento empírico:

$$F_{t+1} = F_t + (I \cdot \Delta t) - \left(K_{sat} \left[\frac{1}{\max(t_{pausa}, 0, 1)} \right]^\lambda \cdot \Delta t \right) \quad (3.5)$$

Donde λ es un coeficiente de amortiguamiento que regula la velocidad de recuperación como se muestra en la Tabla 3-6 y t_{pausa} es el tiempo acumulado sin saturación superficial. La sustracción de este término de drenaje reduce el valor de F , lo que matemáticamente incrementa la capacidad de infiltración (f_p) para los siguientes pasos de tiempo, simulando la desecación del frente húmedo. Finalmente, se aplica una restricción de límite inferior basada en la condición AMC inicial para asegurar la estabilidad numérica del balance hídrico.

La incorporación de un límite o 'freno' a la recuperación de la capacidad de infiltración en el modelo propuesto se fundamenta en las observaciones experimentales de Dunkerley (2016). En sus ensayos bajo lluvia simulada de intensidad fluctuante, demostró que la recuperación de la tasa de infiltración durante los hiatos no es absoluta, sino que presenta un comportamiento amortiguado dependiente de la humedad antecedente.

El diagrama de flujo que ilustra de mejor manera la metodología presentada en el anexo en la Figura A 3.3.1.

3.4. Balance hídrico y cálculo de la escorrentía

La escorrentía es el exceso de intensidad sobre la tasa de infiltración. En base a los 4 puntos muestreados generó un modelo capaz de contar con la capacidad de infiltración en toda la cuenca. Debido a la baja densidad de datos ensayados se utiliza además la geología, el uso de suelo y datos bibliográficos para así adjudicar un valor de infiltración a cada punto que comparado con la interpolación de intensidad resulta la escorrentía en mm/h según corresponda.

De acuerdo con Oyarzún et al (2011) en una plantación forestal las tasas de infiltración oscilan en período de invierno los 6.7 ± 5.0 mm/h, mientras que la conductividad hidráulica saturada en bosques nativos oscila entre 76.9 ± 56.7 mm/h. El área urbana, al tratarse de zonas semi-rurales se le otorgó un 50% de la infiltración del suelo circundante. Las tasas bajan de acuerdo con la variación calculada en la sección anterior. Los valores seleccionados se presentan en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Tasas de infiltración por tipo de suelo y unidad geológica

Uso de suelo		Tasa [mm/hr]
Suelos abiertos	Pz4b	31.58
	PE1/Tr1c	30.00
	CPg/Qm	12.55
Bosques	Nativo	80.00
	Plantación	11.70
	Mixto	40.00
Áreas urbanas e industriales	-	6.00
Cuerpos de agua	-	0.00

Los valores de la Tabla 3-7 fueron generalizados en base a los ensayos tomados y al valor proveniente de la estimación de la tasa de infiltración. Los bosques nativos por su parte no consideran un cambio de acuerdo con el tipo de suelo.

Para perfeccionar el modelo se agregó un porcentaje de intercepción a la precipitación exclusivamente a las zonas boscosas. Los datos de CONAF (2015), indican que en la cuenca hay principalmente bosques de pinos o árboles nativos. De acuerdo con Iroumé y Huber (2000) para plantaciones de pino Oregón el porcentaje de intercepción es de 34% y 26% en bosques nativos.

El cálculo del exceso de precipitación se realizó en el *software* QGis 3.42.0. Donde se sobrepuso la capa de interpolación de la intensidad a la capacidad de infiltración. Las áreas, donde la intensidad fue mayor que la capacidad de infiltración adjudicada al suelo, se realiza la sustracción ($I - f_p$) obteniendo así la intensidad de escorrentía. La intensidad se transformó de mm/h a m/h, lo que multiplicado por el área del balance resulta en el caudal de escorrentía. En la en la Figura A 3.4.1 y Figura A 3.4.2 se muestran alguna de las condiciones integradas para la realización de los cálculos. En la Figura A 3.4.3 se muestra el formato de salida de los resultados

3.5. Conclusión

Se presentó el área de estudio de la investigación, sus principales características hidrológicas, así como los materiales y métodos para el análisis de los procesos que controlan el balance hídrico con especial énfasis en la infiltración y la escorrentía de la cuenca del río Carampangue.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En esta sección se describen los resultados obtenidos. En primer lugar, se analiza la precipitación, luego la infiltración y el balance que permite estimar la generación de esorrentía durante los eventos identificados.

4.2. Caracterización espaciotemporal de la precipitación.

La Figura 4-1 muestra la precipitación para las 4 tormentas analizadas.

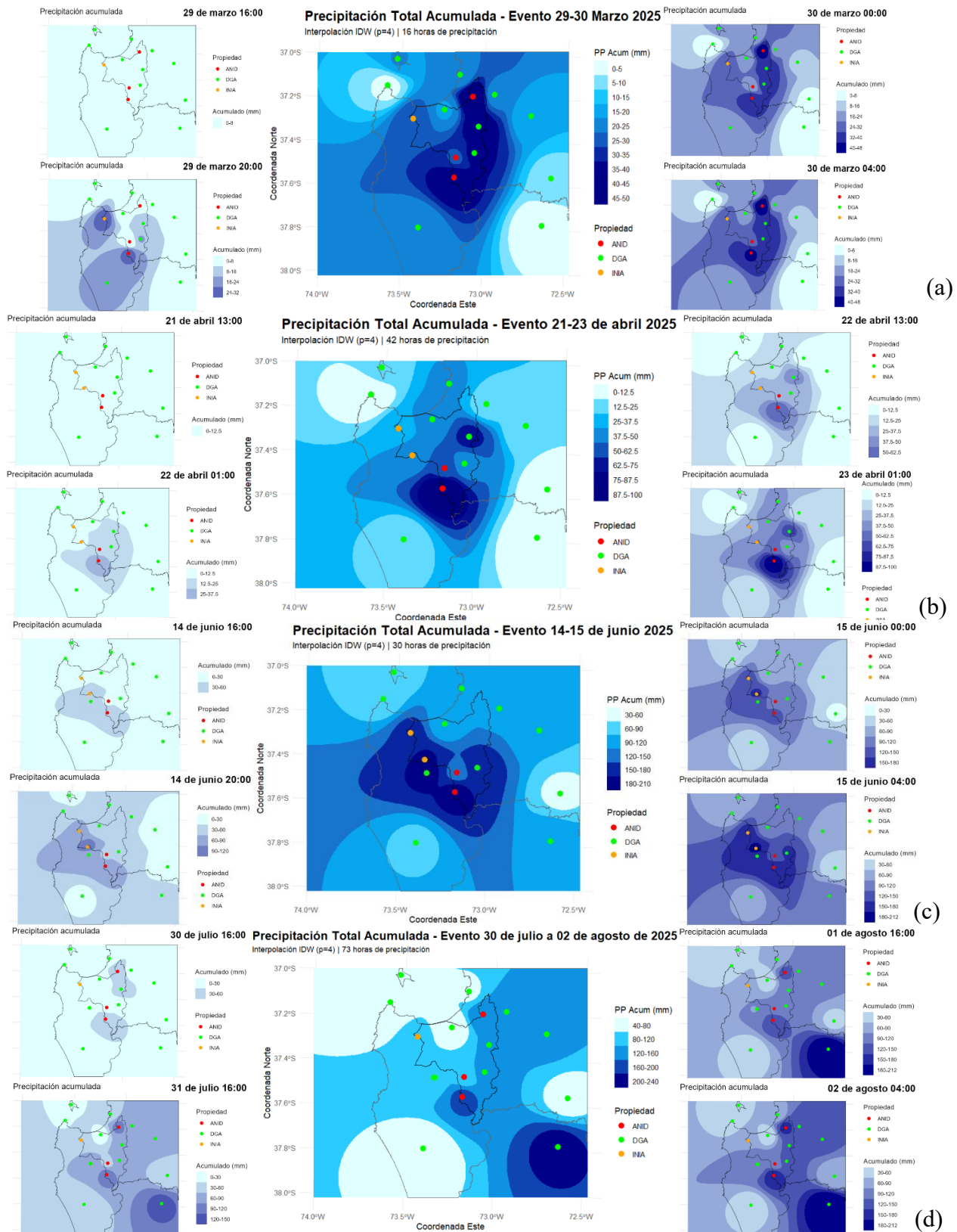


Figura 4-1. Precipitación 2025 durante las tormentas ocurridas el 29 y 30 de marzo (a), 21 y 23 de abril (b), 14 y 15 de junio (c), 30 de julio y 2 de agosto (d)

Para la tormenta del 29/03/2025 se aprecia que el supuesto de la concentración en la alta montaña es válido. En la izquierda se muestra la acumulación en las horas iniciales de la precipitación donde se ve que está comienza desde el sureste.

Para la tormenta ocurrida el 21-23 de abril se ve más a detalle el comportamiento que tuvo la tormenta que ocurrió durante 42 horas y acumuló un máximo total de 95.8 milímetros en la estación Trongol Alto, seguida de 65.1 milímetros en la estación Los Quinques de la DGA y en tercer lugar Bajo Cifuentes con 55.6 milímetros, todas con una altitud sobre los 388 msnm.

La tormenta más grande registrada por las estaciones ocurrió entre el 14 y 15 de junio de 2025, aunque debido a un problema técnico ocurrido en estaciones como Los Morros y Los Quinques no se contó con toda la información precisada para la alta montaña. Nuevamente la máxima precipitación acumulada ocurre en zonas de mayor altitud, en particular se repite Trongol Alto como la estación con más lluvia acumulada con 190 milímetros en 30 horas transcurridas de tormenta, seguido de manera cercana por estaciones que registraron sobre 140 milímetros como Bajo los Ríos, La Colcha, Los Puentes y alguna más atípica como lo fue el caso de Curanilahue con 184.7 mm.

La tormenta 30 de julio al 2 de agosto de 2025 tuvo un total de 73 horas donde la mayor concentración fue fuera de la cuenca, específicamente en la estación Angol. Pero dentro de la cuenca nuevamente se repite que la máxima precipitación caída fue en Trongol Alto, seguido de Los Morros y Bajo Cifuentes, cada uno con 169, 157 y 128 milímetros caídos.

De los análisis previos se puede obtener un cierto patrón en la cantidad de precipitación caída al interior de la cuenca. Por ello, en base a la Tabla 3-1, se genera un resumen de la precipitación acumulada por las estaciones que poseían los datos en dicho paso de tiempo. Con ello se puede tener un mejor entendimiento de puntos críticos dentro de la cuenca donde la cantidad de lluvia por año es mayor.

Tabla 4-1. Resumen de precipitación acumulada por tormenta y su duración.

Estación	Propiedad	29-03-2025	22-04-2025	14-06-2025	30-07-2025
	Duración [h]	16	42	30	73
	PP acumulada [mm]				
Bajo Cifuentes	ANID	30	56	143	105
Trongol Alto	ANID	41	96	190	169
Ramadillas	ANID	-	-	-	-
Los Morros	ANID	46	-	-	157
La Colcha	INIA	26	44	182	-
Las Puentes	INIA	29	33	158	88
Curanilahue	DGA	-	41	184	118
Carampangue	DGA	20	44	103	42
Santa Juana	DGA	23	20	114	144
Los Quinques	DGA	38	65	-	122
Bajo los Rios	DGA	36	44	161	128
Isla Santa Maria	DGA	20	18	72	51
Punta Lavapie	DGA	4	1	77	47
Lota	DGA	21	39	108	76
Laja	DGA	15	13	94	132
Rio BioBio en Coihue	DGA	8	4	56	68
Canete	DGA	21	19	85	48
Angol	DGA	0	0	119	211
Rio Curanilahue	DGA	-	-	-	101

Por ello, nuevamente haciendo eco de la Tabla 3-1 y de lo documentado en la Tabla 4-1 donde se ve que, en las estaciones de mayor altitud como Trongol Alto, Los Morros y Bajo Cifuentes presentan mayor cantidad de precipitación anual, lo que corrobora la acción del efecto orográfico al interior de la cuenca. Por lo que dichos puntos son de mayor interés en cuanto temas de infiltración debido a que en primer lugar se trata de suelos de montaña y presentan mayor cantidad de precipitación.

4.3. Caracterización espacio-temporal de la infiltración

La Figura 4-2 muestra la variación en la tasa de infiltración para las 4 tormentas analizadas a escala sub horaria.

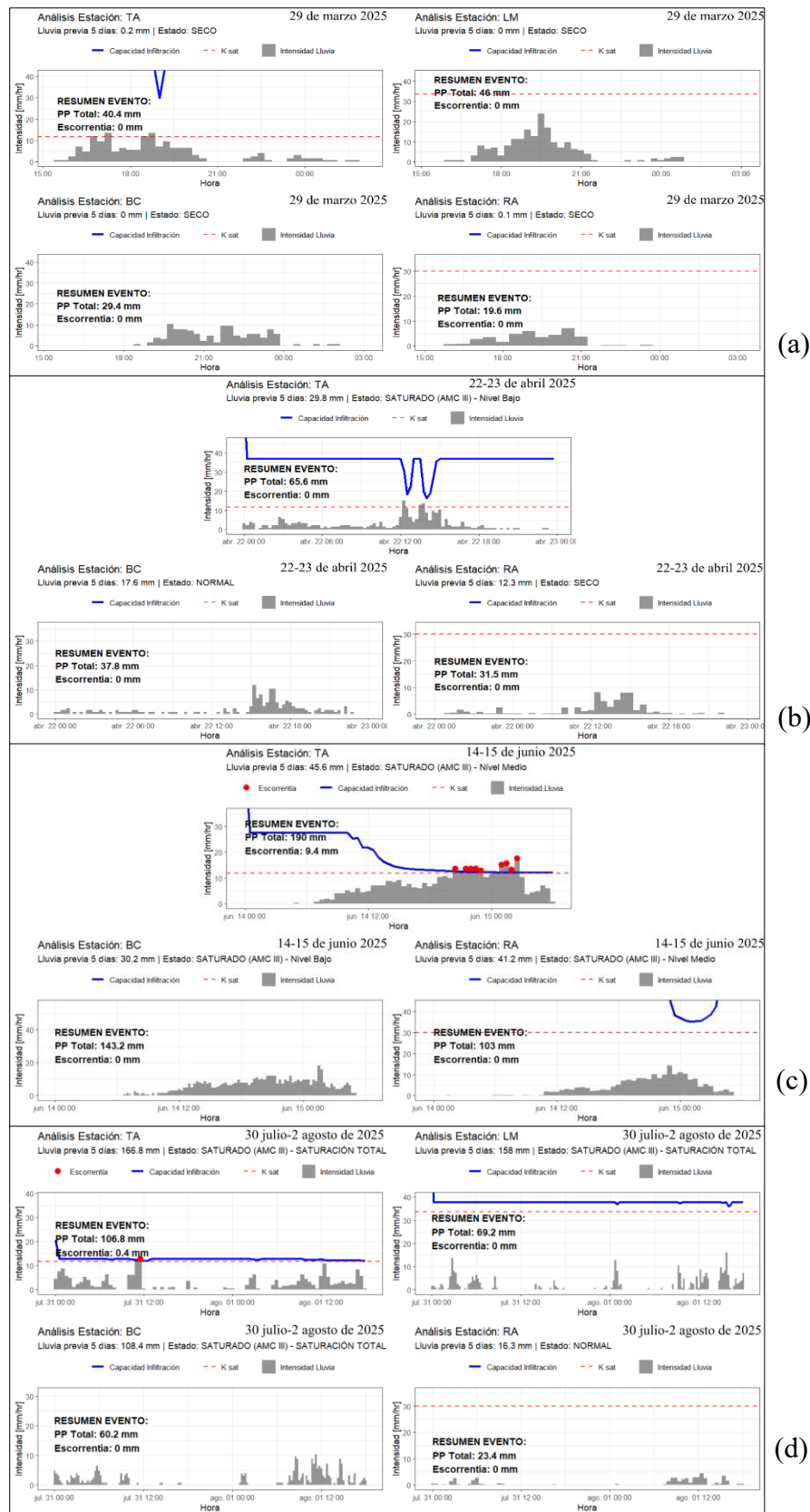


Figura 4-2. Variación de la tasa de infiltración durante las tormentas ocurridas el 29 y 30 de marzo (a), 21 y 23 de abril (b), 14 y 15 de junio (c), 30 de julio y 2 de agosto (d)

La tormenta del 29/03/2025 tuvo bajas intensidades en torno a 10 mm/h como se ve en la Figura 4-2.a. Existió un peak en la estación Los Morros de 24 mm/h el cual no es suficiente para sobrepasar la condición hidráulica saturada del suelo de dicha área. Agregado a que el suelo se encuentra en una condición seca por nula lluvia previo toda la precipitación infiltra.

Para la tormenta del 22/03/2025 existe humedad antecedente. Por ello casos como Trongol Alto en la Figura 4-2.b, comienza una tasa de infiltración reducida donde las intensidades bajas mantienen la tasa constante, mientras que intensidades altas reducen la capacidad de infiltración. Bajo Cifuentes mantiene su tasa de infiltración a pesar de la variación de la intensidad. Ramadillas considera una condición AMC seca por lo que no se espera una fluctuación de la tasa de infiltración.

La tormenta del 14/06/2025 fue la de mayor acumulación en el año 2025. Los días previos registran lluvias acumulada entre 30 y 45 milímetros otorgando una condición saturada. En Trongol Alto se puede observar que existe un porcentaje de la lluvia que escurre. Bajo Cifuentes pese a contar con una humedad antecedente e intensidades altas no se alcanza escorrentía debido a su alta tasa de infiltración. Ramadillas al presentar altas intensidades de manera continua presenta una baja en la capacidad de infiltración sin llegar al límite, luego tras un periodo de baja intensidad vuelve a recuperar la tasa inicial. Todo esto se ve la Figura 4-2.c. Un balance más detallado se presenta en la Figura A 4.3.1.

Para la tormenta entre el 31/07/2025 y 02/08/2025 en la Figura 4-2.d, presentó casos de humedad antecedente extrema, con más 100 mm acumulada en ciertas estaciones, lo que genera una baja tasa de infiltración inicial. Trongol Alto existió escorrentía de 2.1 mm, lo que es un 1.95% de lo precipitado. Bajo Cifuentes mantiene una excelente capacidad de infiltración por lo que condición saturada no presenta variación, lo que coincide con una buena redistribución en arena limpia. Ramadillas presenta baja intensidad por lo que la tasa de infiltración no varía. Los Morros mantiene una tasa de intensidad afectada por la humedad antecedente con un poco de variación ante altas intensidades, pero no suficiente para la generación de escorrentía.

4.4. Balance hídrico de la escorrentía a escala sub-horaria

En base a la caracterización de la infiltración, la tormenta entre el 14/06/2025 y 15/06/2025 como se ve en la Figura 4-2, presenta 2 períodos de escorrentía independientes. Los que son cuantificados a caudal.

Tabla 4-2. Escorrentía generada e intensidad máxima tormenta del 14 y 15 de junio del 2025.

Hora	Caudal [m^3/s]	Intensidad máxima [mm/hr]
14-06-2025 20:30	41.98	18
14-06-2025 21:30	23.26	18
14-06-2025 22:00	20.33	14
14-06-2025 22:30	23.14	15
14-06-2025 23:00	55.65	15
15-06-2025 01:00	16.98	15
15-06-2025 01:30	21.38	16
15-06-2025 02:00	46.44	18
15-06-2025 02:30	12.07	18
Total	261.49 m^3/s	

Se observa en la Tabla 4-2 que una mayor intensidad no está necesariamente ligada a una mayor escorrentía sino más bien tiene relevancia en qué lugar ocurre esa máxima intensidad. Esto se puede ver más a detalle en la tabla de caudal desglosada por uso de suelo en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Caudal de escorrentía generado por uso de suelo para tormenta 14 y 15 de junio de 2025.

		Q [m^3/s] 14 de junio					Q [m^3/s] 15 de junio			
Uso de suelo		20:30 hrs	21:30 hrs	22:00 hrs	22:30 hrs	23:00 hrs	1:00 hrs	1:30 hrs	2:00 hrs	2:30 hrs
Áreas Desprovistas de Vegetación		0.21	0.16	0.11	0.21	0.37	0.57	0.9	0.59	1.52
Áreas Urbanas e Industriales		12.41	11.08	9.45	11.5	14.98	6.66	4.6	0.01	0
Bosques	Nativo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Plantación	2.08	0.01	0	0	0	0	0	9.02	1.12
	Mixto	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuerpos de Agua		15.43	7.56	9.06	6.89	10.16	7.51	5.87	2.75	3.57
Humedales		0.11	0.03	0	0.08	1.41	0	0.02	0.03	0
Praderas y Matorrales		11.09	3.91	1.64	4.29	24.04	2.18	8.97	29.63	5.59
Terrenos Agrícolas		0.65	0.51	0.07	0.17	4.69	0.06	1.02	4.41	0.27

La Tabla 4-3 ejemplifica de mejor manera el impacto que tiene la variabilidad espacio-temporal de la precipitación al interior de la cuenca y cómo va generando caudales máximos en diferentes zonas con los pasos de tiempo. También se puede poner en valor el efecto que tiene la intercepción de la precipitación en las zonas de bosque generando escorrentía solo en horas puntuales.

La investigación logró también cuantificar el caudal de escorrentía por unidad geológica.

Tabla 4-4. Caudal generado por unidad geológica para tormenta 14 y 15 de junio de 2025

Geología	14 de junio					15 de junio			
	20:30 hrs	21:30 hrs	22:00 hrs	22:30 hrs	23:00 hrs	1:00 hrs	1:30 hrs	2:00 hrs	2:30 hrs
CPg	2.19	3.74	1.01	1.03	15.22	2.81	10.91	43.68	8.5
Mlm	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P1m	11.54	6.02	5.17	4.84	8.05	4.46	3.24	0.73	1.28
PEl	4.67	1.37	1.39	1.8	1.84	2.5	1.25	0.64	0.57
Pz4b	0.78	0.78	0.71	0.73	1.31	0.47	0.49	0.24	0.28
Qm	22.61	11.35	12.05	14.74	29.23	6.74	5.49	1.15	1.44
Trlc	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

En primer lugar, hay que recalcar que las geologías observadas en la Tabla 4-4 que no presentan escorrentía son debidas a la poca presencia de estas en la cuenca con apenas un 0.92% del total, agregado a que están cubiertas de bosque.

Algo a destacar, es que la primera escorrentía que se produce comienza en los depósitos litorales (Qm) y secuencias turbidicas (P1m) que de acuerdo con (c) en la Figura 4-1 es el sitio por donde comienza a acumularse la precipitación. Y al pasar de las horas el máximo caudal de escorrentía ocurre en las zonas de rocas plutónicas (CPg) correspondientes a la zona de alta montaña. Correspondiéndose bien con la caracterización de las tormentas.

Para la tormenta del 31/07/2025 generó un punto de escorrentía, el cual es cuantificado en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Caudal de escorrentía generada e intensidad máxima tormenta del 31 de julio del 2025.

Hora	Caudal [m^3/s]	Intensidad máxima [mm/hr]
31-07-2025 11:30	0.42	13

En la Tabla 4-5 se puede ver lo que sucede cuando solo precipita en una zona de la cuenca con una intensidad y un suelo acorde, generando una escorrentía baja. De igual forma se realiza un desglose de la precipitación por uso de suelo presentado en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Caudal generado por uso de suelo para tormenta 31 de julio de 2025

Uso de suelo		31-07-2025 11:30
Áreas Desprovistas de Vegetación		0.00
Áreas Urbanas e Industriales		0.00
Bosques	Nativo	0.00
	Plantación	0.00
	Mixto	0.00
Cuerpos de Agua		0.00
Humedales		0.00
Praderas y Matorrales		0.41
Terrenos Agrícolas		0.01

Así como por unidad de geología.

Tabla 4-7. Caudal generado por unidad geológica para tormenta 31 de julio de 2025

Geología	31-07-2025 11:30
CPg	0.42
M1m	0.00
P1m	0.00
PE1	0.00
Pz4b	0.00
Qm	0.00
Tr1c	0.00

La Tabla 4-6 y la Tabla 4-7 ratifican que la precipitación ocurrió debido al uso de suelo y la unidad donde existió la escorrentía, ya que no hubo agua caída en humedales ni cuerpos de agua presentes hacia el oeste de la cuenca. Además, debido a la baja intensidad, muy difícilmente ocurriría escorrentía en los bosques por el porcentaje de intercepción inherente a estos.

4.5. Conclusión

Se presentaron los principales resultados en base a los objetivos planteados. La interpolación de la precipitación para cada tormenta marcó un claro patrón de mayor acumulación en la alta montaña. La

infiltración arrojó una influencia clara de la humedad antecedente. La escorrentía mostró que no necesariamente basta con que exista una alta intensidad para generar un alto caudal de escorrentía, sino más bien depende netamente del lugar donde se encuentre concentrada, desligando así la idea de que la precipitación y el caudal presentan igual período de retorno.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

La investigación logró validar con éxito la respuesta hidrológica de un suelo ante un escenario real integrando datos de campo al método de Green-Ampt con redistribución modificado (GAR). A diferencia de las metodologías empíricas convencionales, que se limitan a curvas de decaimiento exponencial ideales, el modelo fue capaz de ajustar intervalos de pausa y variaciones en la intensidad de la precipitación, simulando eficazmente la recuperación de la capacidad de infiltración del suelo (histéresis). Esto ofrece una representación más fiel de la realidad física utilizando parámetros obtenibles localmente, y permite predecir el comportamiento del terreno basándose en su condición de humedad antecedente.

El análisis comparativo determinó que la clasificación de texturas USCS no es suficiente para predecir la respuesta hidrológica; la estructura y el grado de compactación del suelo cumplen un rol relevante. Esto se evidenció al contrastar la estación de Bajo Cifuentes, que actuó como drenaje libre con una tasa superior a los 300 mm/h, frente a Trongol Alto donde la compactación antrópica redujo la capacidad de infiltración drásticamente a ~11 mm/h. Este hallazgo demuestra como dos suelos arenosos similares pueden comportarse de manera opuesta, transformando una superficie permeable en una capaz de genera escorrentía. Lo que remarca la importancia de los estudios *in-situ* para evitar subestimaciones de riesgo en posibles diseños hidráulicos.

Mediante la programación de la metodología, se obtuvo un algoritmo capaz de cuantificar el balance hídrico evento a evento, generando estimaciones de los porcentajes de infiltración y escorrentía superficial. Esta capacidad de cálculo distribuido permite discernir con precisión entre eventos de alto riesgo y aquellos sin peligro. Constituyendo un elemento de alto valor para el dimensionamiento eficiente de obras de drenaje y control de crecidas.

La investigación ofrece una herramienta versátil que respaldada con un correcto estudio de la zona permite una modificación de propiedades del suelo y hietogramas de entrada. Al no limitarse al caso de estudio actual, el código facilita la simulación de escenarios hipotéticos y su ajuste a otras zonas geográficas. Esta adaptabilidad dota al algoritmo de versatilidad para investigaciones futuras que requieran cuantificar procesos de lluvia-escorrentía bajo una metodología replicable.

Los resultados obtenidos mediante la modelación con el algoritmo demuestran que no existe una correlación lineal estricta entre los picos de intensidad de precipitación y los caudales máximos generados. Este hallazgo refuta, para la cuenca de estudio, la validez del supuesto que asume que el periodo de retorno del hietograma de diseño se traduce directamente en un periodo de retorno idéntico para el hidrograma de salida. Sino más bien la escorrentía depende más bien del sitio donde exista la mayor intensidad y la humedad antecedente que presente el suelo. Ya que se observó además que tormentas de alta intensidad sobre suelos con condición seca resultaron en volúmenes de escorrentía menores que tormentas de intensidad moderada ocurridas bajo condiciones saturada. Esto valida la importancia de la inicialización dinámica del déficit de humedad ($\Delta\theta$) implementada en el modelo.

Si bien la metodología híbrida de datos de terreno y teóricos permitió una caracterización espacial coherente de la cuenca, se identifica una oportunidad de mejora significativa en la calibración de las tasas de infiltración. Para futuras modelaciones, se sugiere implementar un muestreo estratificado que cubra intersecciones específicas entre unidad geológica y uso de suelo. La obtención de infiltración en terreno permitiría reemplazar los valores bibliográficos por datos locales, reduciendo la incertidumbre asociada a la heterogeneidad espacial del suelo.

Referencias

ASTM International. (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM D2487-17e1).

Bouraoui, F., & Dillaha, T. A. (1996). ANSWERS-2000: Runoff and sediment transport model. *Journal of Environmental Engineering*, 122(6), 493–502. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1996\)122:6\(493\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1996)122:6(493))

Bouwer, H. (1986). Intake rate: Cylinder infiltrometer. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2.^a ed., pp. 825–844). American Society of Agronomy & Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c32>

Bouwer, H., Back, J. T., & Oliver, J. M. (1999). Predicting Infiltration and Ground-Water Mounds for Artificial Recharge. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(4), 350-357. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:4\(350\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:4(350))

Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media (Hydrology Paper No. 3). Colorado State University.

Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113(1), 901–930.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.

Corporación Nacional Forestal. (2015). Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile [Conjunto de datos vectoriales]. Ministerio de Agricultura. <https://sit.conaf.cl/>

Dirección General de Aguas. (2022). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en Cuenca del Río Lebu, Río Carampangue y Carampangue-Lebu (Cuenca Costeras Carampangue-Lebu). Ministerio de Obras Públicas. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/208277>

Dirección General de Aguas. (2025). *Plataforma de Información de Recursos Hídricos: Consulta de datos históricos y en tiempo real*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Recuperado el 14 de agosto de 2025, de <https://snia.mop.gob.cl/sad/>

Dunkerley, D. (2016). An approach to analysing plot scale infiltration and runoff responses to rainfall of fluctuating intensity. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10990>

Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics: Part I. The flow of air and water through soils. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24.

Hazen, A. (1904). On sedimentation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 53(1), 45–71. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0001655>

Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1), 446–460. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>

Horton, R. E. (1939). Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. *Transactions, American Geophysical Union*, 20(4), 693–711. <https://doi.org/10.1029/TR020i004p00693>

Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2025). Red Agrometeorológica de INIA: Datos meteorológicos de estaciones automáticas. Recuperado el 14 de enero de 2026, de <https://agromet.inia.cl/>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2025). Resultados Censo de Población y Vivienda 2024. <https://censo2024.ine.gob.cl/>

Iroumé, A., & Huber, A. (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 21(1), 45-56. <https://doi.org/10.4206/bosque.2000.v21n1-05>

- Iroumé, A. & Schäfer, M. (2000) Variabilidad espacial y temporal de la infiltración en una cuenca experimental en la Cordillera de Los Andes, IX Región, Chile. *Agro Sur* 28, 1-9
- Ogden, F. L., & Saghafian, B. (1997). Green and Ampt infiltration with redistribution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), 386-393.
- Oyarzún, Carlos E, Frêne, Cristian, Lacrampe, Gustavo, Huber, Anton, & Hervé, Pedro. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosque (Valdivia)*, 32(1), 10-19. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002011000100002>
- Philip, J. R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83(5), 345–357.
- Philip, J. R. (1969). Theory of infiltration. En V. T. Chow (Ed.), *Advances in Hydrosience* (Vol. 5, pp. 215–296). Academic Press.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316–1320, 1328.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), 62–70. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Rojas, Y., Minder, J. R., Campbell, L. S., Massmann, A., & Garreaud, R. (2021). Assessment of GPM IMERG satellite precipitation estimation and its dependence on microphysical rain regimes over the mountains of south-central Chile. *Atmospheric Research*, 253, 105454 . <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105454>

Rojas Vilches, O., Martínez Reyes, C., & Jaque Castillo, E. (2010). Recurrencia histórica por inundación fluvial en el curso inferior del río Carampangue, Región del Bio-Bío. *Tiempo y Espacio*, 25.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital (Publicación Geológica Digital No. 4, CD-ROM, versión 1.0).

Shao, Q., & Baumgartl, T. (2016). Field evaluation of three modified infiltration models for the simulation of rainfall sequences. *Soil Science*, 181(2), 45–56.

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. En *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference* (pp. 517–524). ACM. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>

Soil Conservation Service. (1972). *National engineering handbook*, Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture.

Stöwhas Borghetti, L. (2017). *Fundamentos de Hidrología aplicada*. Editorial USM.

Anexo 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☐ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☒ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☒ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☒ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a los que contribuye este estudio son el ODS-11, ODS-13 y ODS-15.

En cuanto al ODS-11, entrega información esencial sobre la evolución de la precipitación, la infiltración y el régimen de escorrentía, permitiendo fortalecer la planificación territorial y la gestión de riesgos en comunidades expuestas a eventos hidrometeorológicos.

En lo referente al ODS-13, el análisis integrado de la precipitación, la humedad del suelo y la capacidad de infiltración aporta una comprensión más precisa de la variabilidad hidrometeorológica y promueve decisiones basadas en evidencia.

Respecto del ODS-15, la caracterización del suelo, su respuesta hidráulica y su relación con el uso del territorio permite identificar zonas sensibles dentro de la cuenca, favoreciendo su protección y el manejo sostenible de los ecosistemas.
--

Anexo 3.2

Sistema USCS de Clasificación de Suelos

IDENTIFICACION EN EL CAMPO				SMB/LO DEL GRUPO	% PASA 0.009MM	NOMBRES TIPICOS	CRITERIOS DE CLASIFICACION EN EL LABORATORIO							
SUELO DE GRANO GRUESO < 50% PASA 0.08MM [TAMIZ # 200]	GRAVAS < 50% PASA 0.05MM [TAMIZ # 4]	GRAVAS LIMPAS (CON POCOS FINOS O SIN ELLOS)	AMPLIA GAMA DE TAMAÑOS Y CANTIDADES APRECIABLES DE TODOS LOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	GW	< 5	GRAVA BIEN GRADUADA, MEZCLA DE GRAVA Y ARENAN CON POCOS FINOS O SIN ELLOS	UTILIZARSE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENAN A PARTIR DE LA CURVA GRANULOMETRICA SEGUN EL PORCENTAJE DE FINOS (FRACCION QUE PASA POR EL TAMIZ # 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: GW, GP, SW, SP GM, GS, SM, SC CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL EMPLEO DE SIMBOLOS DOBLES (GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC) EL TAMIZ # 200	MEJORES DEL 5% MAS DEL 12% 5% AL 12%	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ MAYOR QUE 4	$C_c = \frac{D_{30}^4}{D_{60} \cdot D_{10}}$ ENTRE 1 Y 3				
			PREDOMINIO DE UN TAMAÑO O UN TIPO DE TAMAÑO, CON AUSENCIA DE ALGUNOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	GP		GRAVA MAL GRADUADA, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA CON POCOS FINOS O SIN ELLOS			NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS GRANULOMETRICOS DE LAS GW (GP = $C_u \leq 6$ y $C_c < 1$ o $C_c > 3$) - (GW = $C_u > 4$ y $C_c < 1 \pm 3$)					
	ARENAS > 50% PASA 0.05MM [TAMIZ # 4]	ARENAS LIMPAS (CON POCOS FINOS O SIN ELLOS)	FRACCION FINA NO PLASTICA (PARA LA IDENTIFICACION VER EL GRUPO ML MAS ABAJO)	GM	> 12	GRAVAS LIMOSAS, MEZCLA MAL GRADUADAS DE GRAVA ARENA Y LIMO			LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA A O I_p MENOR QUE 4 ($I_p = 0.73 (W_L - 20) < 4$)	POR ENCIMA DE LA LINEA A CON I_p ENTRE 4 Y 7, CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL USO DE SIMBOLOS DOBLES				
			FINOS PLASTICOS (PARA IDENTIFICARLOS VER EL GRUPO CL MAS ABAJO)	GC		GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLA MAL GRADUADAS DE GRAVA, ARENA Y ARCILLA			LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA A O I_p MAYOR QUE 7 ($I_p = 0.73 (W_L - 20) > 7$)					
SUELO DE GRANO FINO > 50% PASA 0.08MM [TAMIZ # 200]	ARENAS CON FINO (CANTIDAD APRECIABLE DE FINOS)	ARENAS LIMPAS (CON POCOS FINOS O SIN ELLOS)	AMPLIA GAMA DE TAMAÑOS Y CANTIDADES APRECIABLES DE TODOS LOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	SW	< 5	ARENAS BIEN GRADUADA, ARENA CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN ELLOS	UTILIZARSE LA CURVA GRANULOMETRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO INDICADAS EN LA COLUMNA DE IDENTIFICACION EN EL CAMPO	MEJORES DEL 5% MAS DEL 12% 5% AL 12%	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ MAYOR QUE 6	$C_c = \frac{D_{30}^4}{D_{60} \cdot D_{10}}$ ENTRE 1 Y 3				
			PREDOMINIO DE UN TAMAÑO O UN TIPO DE TAMAÑO, CON AUSENCIA DE ALGUNOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	SP		ARENA MAL GRADUADA, ARENA CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN ELLOS			NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS GRANULOMETRICOS DE LAS SW (SW = $C_u > 6$ y $C_c \leq 1 \pm 3$) - (SP = $C_u > 6$ y $C_c < 1 \pm 3$)					
		ARENAS CON FINO (CANTIDAD APRECIABLE DE FINOS)	FINOS NO PLASTICOS (PARA IDENTIFICARLOS VER EL GRUPO ML MAS ABAJO)	SM	> 12	ARENAS LIMOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y LIMO MAS GRADUADA			LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA A O I_p MENOR QUE 4	POR ENCIMA DE LA LINEA A CON I_p ENTRE 4 Y 7, CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL USO DE SIMBOLOS DOBLES				
			FINOS PLASTICOS (PARA IDENTIFICARLOS VER EL GRUPO CL MAS ABAJO)	SC		ARENAS ARCILLOSAS, MEZCLAS MAL GRADUADAS DE ARENAS O ARCILLAS			LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA A O I_p MAYOR QUE 7					
	MÉTODOS DE IDENTIFICACION PARA LA FRACCION QUE PASA POR EL TAMIZ # 40						LINEA A : $I_p = 0.73 (W_L - 20)$							
	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MENOR DE 50	RESISTENCIA EN ESTADO SECO (A LA DISGREGACION)					LIMOS INORGANICOS Y ARENAS MUY FINAS, FLOJO DE ROCA, ARENAS FINAS LIMOSAS O ARCILLAS CON LIGERA PLASTICIDAD	COMPARANDO CON SUELOS CON EL MISMO LIMITE LIQUIDO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	LÍMITE LIQUIDO				
							ARCILLAS INORGANICAS DE PLASTICIDAD BAJA A MEDIA, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS MAGRAS							
		DILATACION (REACCION A LA AGITACION)					LIMOS ORGANICOS Y ARCILLAS LIMOSAS ORGANICAS DE BAJA PLASTICIDAD				CL	CH	OL	OH
						LIMOS INORGANICAS, SUELOS LIMOSOS O ARENOSOS FINOS MICACEOS O CON DIATOMEAS, LIMOS ELASTICOS								
LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MAYOR DE 50	LIGERA A MEDIA	LIGERA A MEDIA	LIGERA	OL		ARCILLAS ORGANICAS DE PLASTICIDAD MEDIA A ALTA	CL - ML	CL - MH	OL - MH	OH				
		LIGERA A MEDIA	LENTO A NULA	LIGERA A MEDIA	MH	ARCILLAS ORGANICAS DE PLASTICIDAD MEDIA A ALTA								
	ALTA A MUY ALTA	NULA	ALTA	CH		ARCILLAS ORGANICAS DE PLASTICIDAD MEDIA A ALTA					CL - ML	CL - MH	OL - MH	OH
		MEDIA A ALTA	NULA A MUY LENTA	LIGERA A MEDIA	OH									
SUELOS ALTAMENTE ORGANICAS				FACILMENTE IDENTIFICABLES POR SU COLOR, OLOR, SENSACION ESPONJOSA Y FRECUENTEMENTE POR SU TEXTURA FIBROSA	Pt	TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS	GRAFICO DE PLASTICIDAD PARA LA CLASIFICACION EN LABORATORIO DE SUELOS DE GRANO FINO							

Figura A 3.2.1. Sistema de clasificación USCS



Figura A 3.2.2. Tamices utilizados y tamizadora mecánica en laboratorio de hidráulica.



Figura A 3.2.3. Muestras tras realización de granulometría.



Figura A 3.2.4. Toma de muestras anillo simple, Bajo Cifuentes

Tabla A 3.2.1. Resultados granulometría Trongol Alto.

Tamiz	mm	g retenido	Retenido acumulado	% retenido	% Ret acumulado	% pasa
N°6	3.35	137	137	14%	13.7%	86.3%
N°8	2.36	82	219	8%	21.9%	78.1%
N°10	2	51	270	5%	27.0%	73.0%
N°12	1.7	36	306	4%	30.6%	69.4%
N°14	1.4	73	379	7%	37.9%	62.1%
N°16	1.18	54	433	5%	43.3%	56.7%
N°18	1	46	479	5%	47.9%	52.1%
N°20	0.85	54	533	5%	53.3%	46.7%
N° 30	0.6	101	634	10%	63.4%	36.6%
N°40	0.45	93	727	9%	72.7%	27.3%
N°50	0.3	76	803	8%	80.3%	19.7%
N°60	0.25	34	837	3%	83.7%	16.3%
N°80	0.16	36	873	4%	87.3%	12.7%
N°100	0.15	19	892	2%	89.2%	10.8%
N°120	0.125	24	916	2%	91.6%	8.4%
N°140	0.106	5	921	1%	92.1%	7.9%
N°170	0.09	16	937	2%	93.7%	6.3%
N°200	0.075	5	942	1%	94.2%	5.8%

Tabla A 3.2.2. Resultado granulometría Los Morros

Tamiz	mm	g retenido	Retenido acumulado	% retenido	% Ret acumulado	% pasa
N°6	3.35	90	90	9%	9.0%	91.0%
N°8	2.36	63	153	6%	15.3%	84.7%
N°10	2	43	196	4%	19.6%	80.4%
N°12	1.7	31	227	3%	22.7%	77.3%
N°14	1.4	64	291	6%	29.1%	70.9%
N°16	1.18	50	341	5%	34.1%	65.9%
N°18	1	44	385	4%	38.5%	61.5%
N°20	0.85	52	437	5%	43.7%	56.3%
N° 30	0.6	94	531	9%	53.1%	46.9%
N°40	0.45	102	633	10%	63.3%	36.7%
N°50	0.3	96	729	10%	72.9%	27.1%
N°60	0.25	46	775	5%	77.5%	22.5%
N°80	0.16	52	827	5%	82.7%	17.3%
N°100	0.15	27	854	3%	85.4%	14.6%
N°120	0.125	30	884	3%	88.4%	11.6%
N°140	0.106	8	892	1%	89.2%	10.8%
N°170	0.09	16	908	2%	90.8%	9.2%
N°200	0.075	10	918	1%	91.8%	8.2%

Tabla A 3.2.3. Resultados granulometría Bajo Cifuentes.

Tamiz	Curva gra	g retenido	Retenido acumulado	% retenido	% Ret acumulado	% pasa
N°6	3.35	122	122	12%	12.2%	87.8%
N°8	2.36	95	217	10%	21.7%	78.3%
N°10	2	50	267	5%	26.7%	73.3%
N°12	1.7	45	312	5%	31.2%	68.8%
N°14	1.4	75	387	8%	38.7%	61.3%
N°16	1.18	58	445	6%	44.5%	55.5%
N°18	1	49	494	5%	49.4%	50.6%
N°20	0.85	49	543	5%	54.3%	45.7%
N° 30	0.6	85	628	9%	62.8%	37.2%
N°40	0.45	73	701	7%	70.1%	29.9%
N°50	0.3	91	792	9%	79.2%	20.8%
N°60	0.25	38	830	4%	83.0%	17.0%
N°80	0.16	42	872	4%	87.2%	12.8%
N°100	0.15	21	893	2%	89.3%	10.7%
N°120	0.125	25	918	3%	91.8%	8.2%
N°140	0.106	7	925	1%	92.5%	7.5%
N°170	0.09	18	943	2%	94.3%	5.7%
N°200	0.075	8	951	1%	95.1%	4.9%

Tabla A 3.2.4. Resultados granulometría Ramadillas

Tamiz	mm	g retenido	Retenido acumulado	% retenido	% Ret acumulado	% pasa
N°6	3.35	247	247	25%	24.7%	75.3%
N°8	2.36	109	356	11%	35.6%	64.4%
N°10	2	57	413	6%	41.3%	58.7%
N°12	1.7	33	446	3%	44.6%	55.4%
N°14	1.4	72	518	7%	51.8%	48.2%
N°16	1.18	50	568	5%	56.8%	43.2%
N°18	1	38	606	4%	60.6%	39.4%
N°20	0.85	42	648	4%	64.8%	35.2%
N° 30	0.6	62	710	6%	71.0%	29.0%
N°40	0.45	62	772	6%	77.2%	22.8%
N°50	0.3	50	822	5%	82.2%	17.8%
N°60	0.25	22	844	2%	84.4%	15.6%
N°80	0.16	23	867	2%	86.7%	13.3%
N°100	0.15	14	881	1%	88.1%	11.9%
N°120	0.125	19	900	2%	90.0%	10.0%
N°140	0.106	7	907	1%	90.7%	9.3%
N°170	0.09	14	921	1%	92.1%	7.9%
N°200	0.075	8	929	1%	92.9%	7.1%

Anexo 3.3

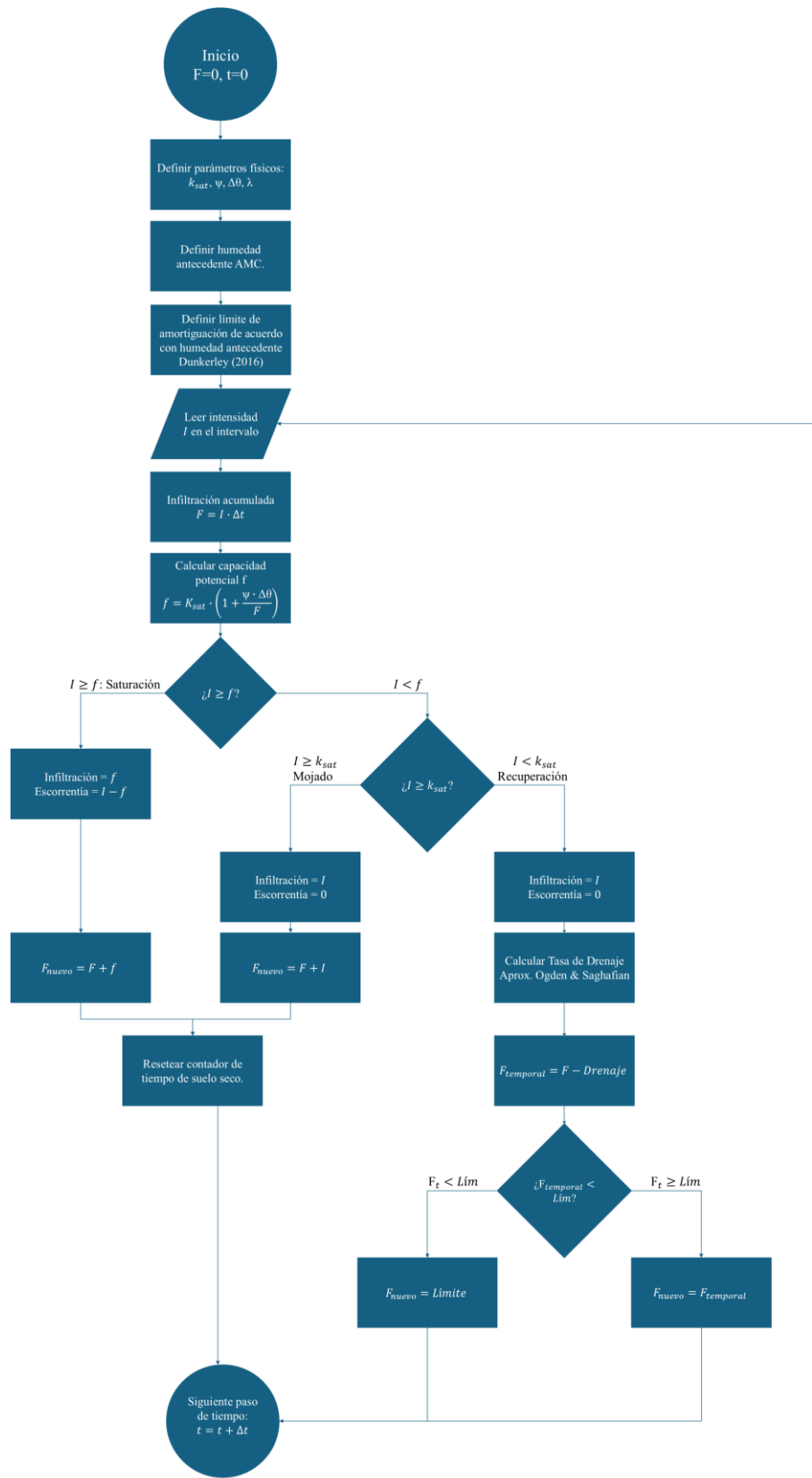


Figura A 3.3.1. Metodología aplicada en el algoritmo.

Anexo 3.4

14Jun_2300 — Field Calculator

☐ Only update 0 selected feature(s)

☒ **Crear un campo nuevo**

☐ Crear campo virtual

Nombre del campo de salida:

Tipo del campo de salida: 1.2 Número decimal (real)

Longitud del campo de salida: Precisión:

Expresión Editor de funciones

```
CASE
  WHEN "SUBUSO" = 'Plantación' THEN
    "Intensidad" * 0.66
  WHEN "SUBUSO" = 'Bosque Nativo' THEN
    "Intensidad" * 0.74
  WHEN "SUBUSO" = 'Bosque Mixto' THEN
    "Intensidad" * 0.70
  ELSE "Intensidad"
END
```

= + - / * ^ || () '\n'

Objeto espacial: Bosque Nativo Renoval Abierto

Previsualizar: 10.36

Figura A 3.4.1. Cálculo de intercepción en zona de bosque.

14Jun_2300 — Field Calculator

☐ Only update 0 selected feature(s)

☒ **Crear un campo nuevo**

☐ Crear campo virtual

Nombre del campo de salida:

Tipo del campo de salida: 1.2 Número decimal (real)

Longitud del campo de salida: 10 Precisión: 2

Expresión Editor de funciones

```

CASE
  WHEN "SUBUSO" = 'Bosque Nativo'
  THEN 77.77
  WHEN "SUBUSO" = 'Bosque Mixto'
  THEN 38.88
  WHEN "SUBUSO" = 'Plantación' THEN
  11.37
  WHEN "USO" = 'Cuerpos de Agua'
  THEN 0
  WHEN "USO" = 'Áreas Urbanas e
  Industriales' THEN 5.83

  WHEN "cd_geol" = 'Pz4b'
  AND "USO" IN ('Praderas y
  Matorrales', 'Áreas Desprovistas de
  Vegetación', 'Terrenos Agrícolas',
  'Humedales')
  THEN 30.70
  
```

Objeto espacial: Bosque Nativo Renoval Abierto

Previsualizar: 77.77

Figura A 3.4.2. Elección de tasa de infiltración de acuerdo con el uso de suelo

14Jun_2300— Objetos Totales: 12071, Filtrados: 12071, Seleccionados: 0

	USO_TIERRA	USO	SUBUSO	cd_geol	lithology	Área (m2)	Intensidad	Int_bosque	f_tasa	Esc(mm/hr)	Q [m3/s]	Q_2300
1	Praderas Peren...	Praderas y Mat...	Praderas	Qm	arena.grava	14571308.82	14	14.00	12.20	1.80	7.29	55.65
2	Ciudades, Pueb...	Áreas Urbanas ...	Ciudades, Pueb...	Qm	arena.grava	1784474.89	14	14.00	5.83	8.17	4.05	55.65
3	Ciudades, Pueb...	Áreas Urbanas ...	Ciudades, Pueb...	Qm	arena.grava	1698189.23	14	14.00	5.83	8.17	3.85	55.65
4	Ríos	Cuerpos de Agua	Ríos	Qm	arena.grava	966786.57	14	14.00	0	14.00	3.76	55.65
5	Rotación Cultiv...	Terrenos Agríco...	Rotacion Cultiv...	Qm	arena.grava	4280939.67	14	14.00	12.20	1.80	2.14	55.65
6	Praderas Peren...	Praderas y Mat...	Praderas	Qm	arena.grava	3457812.83	14	14.00	12.20	1.80	1.73	55.65

Figura A 3.4.3. Caudal de escorrentía calculado para el 14 de junio a las 23:00

Anexo 4.3

¡ATENCIÓN! Se generó escorrentía en los siguientes momentos:

A tibble: 9 × 4

	Fecha	Lluvia_Int	Capacidad_f	Escorrentia_mm
	<dtm>	<db l>	<db l>	<db l>
1	2025-06-14 20:30:00	13.6	12.8	0.391
2	2025-06-14 21:30:00	13.6	12.6	0.525
3	2025-06-14 22:00:00	13.6	12.5	0.569
4	2025-06-14 22:30:00	13.6	12.4	0.603
5	2025-06-14 23:00:00	12.8	12.3	0.231
6	2025-06-15 01:00:00	15.2	12.3	1.47
7	2025-06-15 01:30:00	15.6	12.2	1.68
8	2025-06-15 02:00:00	13.2	12.2	0.499
9	2025-06-15 02:30:00	17.6	12.2	2.71

Figura A 4.3.1. Balance de escorrentía tormenta 14 de junio.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Yerson Alejandro Ríos Soto
Título de la memoria : Análisis de la infiltración en la cuenca del río Carampangue
Fecha de la presentación oral : 30/01/2026

Profesor(es) Guía : Óscar Eduardo Link Lazo
Profesor(es) Revisor(es) : Felipe Alexis Orellana Muñoz
Concepto :
Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

Se analiza la infiltración en la cuenca del río Carampangue a partir de una caracterización de suelos y ensayos de infiltración mediante anillo simple. Los valores de infiltración medidos se usaron para ajustar la ecuación de Green-Ampt modificada por Ogden y Saghafian (1997) para incorporar la redistribución de humedad y considerar así la variación temporal de la infiltración durante una tormenta. Se caracterizó la lluvia mediante el análisis de medición de 19 estaciones meteorológicas instaladas en la cuenca y/o sus alrededores. Se realizó un balance entre la lluvia y la infiltración a una escala de tiempo subhoraria para calcular la generación de escorrentía superficial durante una tormenta. Los resultados muestran una marcada influencia del efecto orográfico en la distribución espacial de las precipitaciones. Asimismo, se observa una variabilidad importante en la infiltración, por ejemplo, en Bajo Cifuentes se encontraron tasas de infiltración superiores a 300 mm/h, mientras que en Trongol Alto se encontraron valores cercanos a 11 mm/h, atribuidos principalmente a la compactación superficial de los suelos. El balance hídrico permitió estimar la generación de escorrentía en función de la humedad antecedente y características del suelo, aportando una herramienta útil para la gestión hidrológica y el diseño de obras hidráulicas.