



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos  
Hídricos

***Análisis de generación de escorrentía superficial en un  
estero intermitente del Secano Interior***

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Agrícola  
Mención Recursos Hídricos

BÁRBARA TERESA MUÑOZ PALMA  
CHILLÁN-CHILE  
2022

Profesor Guía: Dr. José Luis Arumí Ribera  
Departamento de Recursos Hídricos  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Aprobada por:

Profesor Guía

---

Dr. José Luis Arumí Ribera  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora

---

Dr. Octavio Lagos Roa  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora Externa

---

Dr. Hamil Uribe Cifuentes  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias

Director del Programa

---

Dr. Javier Ferrer Valenzuela  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

## INDICE

AGRADECIMIENTO .....	vi
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. HIPÓTESIS .....	4
3. OBJETIVOS .....	5
3.1. Objetivo General .....	5
3.2. Objetivos Específicos.....	5
4. CAPÍTULO 1 .....	6
4.1. Caracterización de la Cuenca San José .....	6
4.1.1. Clima .....	8
4.1.2. Suelo .....	9
4.1.3. Topografía .....	11
4.1.4. Hidrología.....	11
4.2. Estructura y equipos de medición .....	12
4.2.1. Canoa Santa Rita .....	12
4.2.2. Mediciones de precipitación .....	14
4.3. Metodología .....	15
4.3.1. Sintetizar base de datos .....	15
4.3.2. Evolución de la respuesta hidrológica .....	17
4.4. Resultados.....	17
4.5. Comentarios y Conclusiones .....	21
5. CAPITULO 2 .....	22
5.1. Un análisis simple de la producción de caudal mínimo en cuencas hidrográficas del Secano Interior de Chile .....	22
5.1.2. Área de estudio .....	22
5.2. Metodología .....	29
5.3. Resultados y Discusiones.....	31
5.4. Conclusiones .....	36
6. CAPITULO 3 .....	38
6.1. Conclusiones generales.....	38
7. REFERENCIAS.....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Caracterización de la Cuenca Experimental.....	8
Tabla 2. Valores de CN obtenidos para los años 2001, 2002, 2006 y 2012.....	20
Tabla 3. Datos de área de monitorio por estación fluviométrica.....	30
Tabla 4. Resultados métrica original usada por Paez (2018) y modificada.....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación de puntos de medición de escorrentía y precipitación en el área de estudio.....	7
Figura 2. Fisuras típicas que se pueden encontrar en los suelos del secano interior. Se puede observar la fisura se sella con las lluvias.....	10
Figura 3. Río Lonquén a la izquierda en condiciones típicas de verano y a la derecha después de una tormenta en invierno.....	10
Figura 4. Ubicación Cuenca Lonquén. ....	11
Figura 5. Canoa Santa Rosa para aforro en Sub-cuenca de 725 ha.....	13
Figura 6. Sensor de presión conectado a un computador para extraer la información.....	14
Figura 7. Pluviógrafo utilizado en el punto de medición de precipitación.....	15
Figura 8. Gráficos de Escorrentía, Precipitación e Infiltración v/s m <sup>3</sup> /día para años con base de datos más completa.....	19
Figura 9. Mapa ubicación cuencas estudiadas.....	24
Figura 10. Mapas de uso de suelo: A. Cuenca del río Purapel, B. Cuenca del río Cauquenes, C. Cuenca del río Lonquén..	25
Figura 11. Mapa geológico: A. Cuenca del río Purapel, B. Cuenca del río Cauquenes, C. Cuenca del río Lonquén.....	27
Figura 12. Gráfico variación estacional Precipitación (PP) v/s Evapotranspiración Potencial (ET) de la cuenca río Cauquenes.....	28
Figura 13. Gráfico variación anual Precipitación (PP) v/s Evapotranspiración Potencial (ET) de cuencas del Secano Interior.....	28
Figura 14. Curvas de Duración obtenidas para los años 1987 – 2013 para las 5 estaciones fluviométricas analizadas.....	31
Figura 15. Mapa Ocurrencia Aguas Subterráneas: A. Cuenca del río Purapel, B. Cuenca del río Cauquenes, C. Cuenca del río Lonquén.....	33

## **AGRADECIMIENTO**

Los autores de este trabajo quieren expresar su agradecimiento al Centro Fondap CRHIAM proyecto ANID/FONDAP/15130015 y al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) por el apoyo que entregaron a este trabajo.

## RESUMEN

La agricultura depende principalmente de la disponibilidad de agua en el territorio donde se encuentra, principalmente porque condiciona la producción obtenida de los cultivos que allí se pueden desarrollar. Tal es el caso del Secano Costero e Interior de Chile Central donde la actividad silvoagropecuaria debe adaptarse al ciclo de precipitaciones, al no contar con fuentes de agua e infraestructura de riego capaz de compensar la demanda hídrica en el período estival. En este trabajo se estudió la generación de caudales a dos escalas: la cuenca del estero San José y las cuencas de los ríos Lonquén, Cauquenes y Purapel. En el caso del estero San José (7,25 km<sup>2</sup>) se estudiaron los cambios en la generación de caudales en los últimos 19 años (2001-2020) medidos en una estación fluviométrica operada por INIA para analizar el efecto de la variabilidad climática y del cambio de uso de suelo en dichos periodos a través de análisis estadísticos de los datos, determinándose que el tipo de suelo es el principal control de la escorrentía en dicha cuenca independiente del clima y del cambio de cobertura de suelo, pues los suelos arcillosos y expansivos predominantes en esa cuenca se sellan impidiendo la infiltración en invierno. En el caso de la cuenca del río Lonquén, pese a poseer una cuenca aportante de 1160 km<sup>2</sup> y una precipitación anual cercana a 800 mm anuales, se seca desde fines de primavera hasta el inicio del invierno austral, transformándose en un río intermitente. Lo que llama la atención es que otros ríos ubicados al norte: Cauquenes y Purapel, que poseen

menor precipitación y suelos similares, no poseen ese comportamiento. Mediante el análisis de las curvas de duración general se pudo establecer que el río Lonquén se seca durante períodos más extensos, lo que nos llevó a analizar la geología predominante de las cuencas. Se concluye que el factor que influye en el secado del río, a escala de cuenca, es la ausencia de unidades acuíferas que aporten con caudal base a la cuenca.

**Palabras clave:** Curva Número, Curva Duración, Ríos Intermitentes, Ocurrencia Aguas Subterráneas, Secano Interior.



## **ABSTRACT**

It is known that agriculture mainly depends on the availability of water in the territory where it is located, because that conditions the production obtained from the crops that can be grown there. Such is the case of the Dry Coastal and Interior regions of Central Chile where the forestry and agricultural activity must adapt to the rainfall cycle, as it does not have water sources or irrigation infrastructure capable of compensating the water demand during the summer period. In this work, the generation of flows was studied at two scales: the San José creek and the Lonquén, Cauquenes and Purapel river rivers. In the case of the San José watershed (7.25 km<sup>2</sup>), the changes in the generation of flows in the last 19 years (2001-2020) were studied, measured in a fluviometric station operated by INIA to analyze the effect of climatic variability and the change in land use in said periods through statistical analysis of the data, determining that the type of soil is the main control of runoff in said basin independent of the climate and the change in soil cover, since clay-expansive soils predominant in that basin are sealed preventing infiltration in winter. In the case of the Lonquén river basin, despite having a contributing basin of 1,160 km<sup>2</sup> and an annual rainfall close to 800 mm per year, it dries from the end of spring until the beginning of the southern winter, becoming an intermittent river. What is striking is that other rivers located to the north: Cauquenes and Purapel, which have less precipitation and similar soils, do not have this behavior. Through the analysis of the general duration curves, it was

possible to establish that the Lonquén River dries up during longer periods, which led us to analyze the predominant geology of the basins. It is concluded that the factor that influences the drying of the river, at the basin scale, is the absence of aquifer units that contribute with base flow to the basin.

**Keywords:** Curve number, General duration curve, intermittent rivers, groundwater, drylands

## 1. INTRODUCCIÓN

Es conocido que la agricultura depende principalmente de la disponibilidad de agua en el territorio donde se encuentra, principalmente porque condiciona la producción obtenida de los cultivos que allí se pueden desarrollar (Morales, 2016). Esto es particularmente cierto en el caso del Secano Costero e Interior de Chile Central debido a que la actividad silvoagropecuaria debe adaptarse al ciclo de precipitaciones al no contar con fuentes de agua e infraestructura de riego capaz de compensar la demanda por agua en el período estival (Uribe *et al.*, 2004).

La esorrentía superficial se puede definir como la cantidad de agua que una cuenca drena, después de una tormenta (Gaspari *et al.*, 2007). En el Secano Interior el comportamiento de la esorrentía superficial está asociada a diversos factores, tales como topografía, tipo de suelo, intensidad y distribución de las lluvias (Uribe, 2016), altos niveles de degradación del suelo, que, junto a suelos de origen granítico, con presencia de arcillas expansivas, determinan una mínima capacidad de infiltración, sobre todo en condiciones de saturación. Esto provoca que, en temporadas de invierno, cuando ocurre un evento de precipitación y el suelo se encuentra saturado, casi la totalidad del agua escurra hacia los esteros (Uribe *et al.*, 2004).

Por otro lado, es importante definir que son los ríos intermitentes. Éstos son vías fluviales que dejan de fluir en algún punto en el espacio y el tiempo a lo largo de su curso. La interrupción del flujo puede deberse a una pérdida de transmisión, evapotranspiración, cambios descendentes en las capas freáticas, recesión o congelación de la escorrentía en laderas y forma parte de la hidrología natural de arroyos y ríos a nivel mundial.

Uno de los métodos más usados para los estudios de balance hídrico y de escorrentía, es la Curva Número (CN) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU (Capítulo 1). Esto se debe a que este método es fácil de aplicar en condiciones de escasez de datos, como también una forma sencilla de determinar la escorrentía.

El Capítulo 2 se enfoca en la cuenca del río Lonquén, la que se desarrolla en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa en la zona central de Chile, en un territorio conocido como Secano Interior. El río Lonquén, pese a poseer una cuenca aportante de 1160 km<sup>2</sup> y una precipitación anual cercana a 800 mm anuales, se seca desde fines de primavera hasta el inicio del invierno austral, transformándose en un río intermitente.

Para analizar el comportamiento del régimen hídrico del río Lonquén, es necesario comprender como la interacción entre un río y los sistemas de aguas subterráneas de la cuenca aportante definen los mecanismos de generación de

caudales mínimos (Parra *et al.*, 2019). Para ambos mecanismos de generación de escorrentía (drenaje de aguas lluvia y liberación de aguas subterráneas), las características del suelo juegan un papel determinante. Stewart *et al.* (2015) determinaron que los suelos arcillosos expansivos que predominan en la cuenca del río Lonquén en el Secano Interior de Chile controlan la tasa de infiltración al expandirse durante el invierno chileno (donde se concentran las lluvias) sellándose e impidiendo que infiltre agua. Esta condición limita la recarga de aguas subterráneas tal como lo determinaron Uribe *et al.*, (2003).

Por lo anterior, se supuso inicialmente que el comportamiento de la escorrentía del río Lonquén se debe al predominio de suelos arcillosos expansivos en la cuenca, por lo que se realizó un análisis comparativo con las cuencas de los ríos Cauquenes y Purapel que poseen suelos similares.

Uno de los métodos utilizados para estudiar la dependencia de un río a la liberación de aguas subterráneas es el análisis de la Curva de Duración de Caudales (CD o por su sigla en inglés FDC) que es una representación entre la magnitud y la frecuencia o el porcentaje de tiempo que dicha magnitud es igualada o excedida. La porción de la CD que representa específicamente los caudales de estiaje puede ser fijada arbitrariamente entre las probabilidades de excedencia de 50 a 100 %. Curvas con un gradiente suave en esta sección, indican una contribución relevante del almacenamiento subterráneo a la

escorrentía de cauces, mientras que gradientes pronunciados indican una mayor variabilidad diaria de descargas (Q) y corresponden, típicamente, a cuencas de sustrato litológico impermeable, con bajo almacenamiento y rápida respuesta a las precipitaciones (Páez, 2021).

Diversos autores han planteado indicadores que relacionan distintos caudales de excedencia para caracterizar la contribución de agua subterránea al flujo de caudal superficial, entre los que destacan las relaciones de Q90/Q50 mencionado en Smaktin (2001) y la relación  $[(Q25/Q75)^{1/2}]$  de Walton (1965) (Páez, 2021).

En este contexto, el presente estudio tiene por objetivo analizar el funcionamiento de tres ríos a través de las gráficas de CD, en tres cuencas de la zona central de Chile, y que forman parte del Secano Interior: río Purapel, río Cauquenes y río Lonquén. Como estas tres cuencas poseen similar régimen de precipitaciones, condiciones topográficas, suelos, y usos de suelos similares, buscamos determinar qué procesos hidrológicos controla el porcentaje en el que estos ríos se secan.

## **2. HIPÓTESIS**

El régimen de escurrimiento de cuencas pequeñas del secano interior ha cambiado en los últimos 20 años, manifestándose a través de la generación de caudales máximos y caudales medios mensuales. El cambio de régimen se debe

a un cambio de patrón de precipitaciones (más lluvia en primavera verano) o mayor infiltración.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Estudiar los cambios en la generación de caudales en los últimos 20 años (2001-2020) ocurrido en la cuenca del estero San José.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

1. Analizar la serie de tiempo de precipitaciones y caudales medidos en la cuenca del estero San José.
2. Analizar la evolución de la respuesta hidrológica frente a una tormenta a lo largo de 20 años, considerando la mega sequía y el cambio de uso de suelo.
3. Estudiar Curvas de Duración en Cuencas del Secano Interior.

## **4. CAPÍTULO 1**

### **4.1. Caracterización de la Cuenca San José**

El área de estudio se encuentra ubicada en el secano interior de Chile en las coordenadas 36°27' de Latitud Sur y 72°32' de Longitud Oeste, a una altitud entre los 30-230 m sobre el nivel del mar, en el Sector San José de la comuna de Ninhue, región de Ñuble. Esta cuenca ha sido monitoreada por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) desde hace 19 años porque se considera que es una cuenca representativa del secano interior de Ñuble. Para la realización del estudio se ha seleccionado una cuenca representativa con una superficie de 725 ha (Uribe *et al.*, 2004). En la Figura 1 se presentan los puntos de medición de escorrentía, puntos de medición de precipitación y el área de estudio.

La escorrentía de la cuenca es principalmente de origen pluvial con escasos aportes de aguas subterráneas. El cauce estudiado es el estero San José, el cual es afluente del estero Santa Rosa, ambos pertenecen a la cuenca del río Lonquén (Uribe *et al.*, 2004). En la Tabla 1. se entrega una caracterización física de la cuenca en estudio.



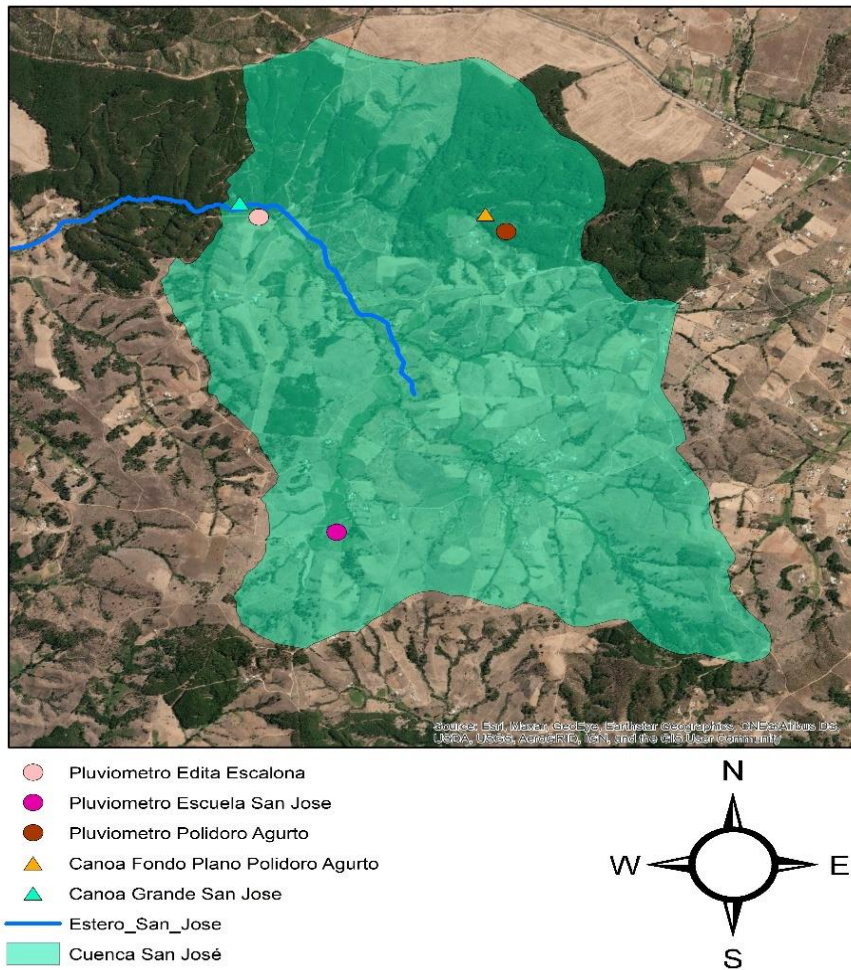


Figura 1. Ubicación de puntos de medición de escorrentía y precipitación en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de Uribe *et al.*, 2004.

Tabla 1. Caracterización de la Cuenca Experimental.

Características	Unidad	Cuenca Experimental
Área	ha	725
Perímetro	Km	14,29
Elevación mínima	m	55
Elevación máxima	m	230
Longitud del cauce principal	Km	2,84
Pendiente del cauce principal	M/m	0,0193

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.1.1. Clima**

El clima del área corresponde a mediterráneo marino, la precipitación anual promedio fluctúa entre 640-1100 mm pero con un rango de variación entre años muy amplia (Del Pozo, 1999).

El 80% del agua precipita entre marzo y agosto, y sólo el 15% ocurre entre el período septiembre a noviembre. Esto determina que el agua disponible para los cultivos en promedio dure hasta octubre. La evapotranspiración potencial anual varía entre 944-1244 mm.

La temperatura promedio anual fluctúa entre 13,3 y 15,6 °C con una temperatura mínima del mes más frío (julio) entre 3,9 y 5,2 °C y temperatura máxima del mes más cálido entre 27 y 31,1 °C. Las horas de frío anuales son entre 850 y 1200 horas (Del Pozo, 1999).

#### **4.1.2. Suelo**

Los suelos son de origen granítico, profundos, con perfiles arcillosos densos y muy compactos, de textura franco arcillo arenosa y presencia de cuarzo. Con colinas ondulantes, muy erosionadas, debido a que la fuerza de adhesión entre las partículas es baja. Poseen bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de fracciones de limo y arcilla. Los suelos que ocupan posiciones altas e intermedias han estado sometidos a una severa acción geológica. Esto sumado a una erosión hídrica acentuada por la acción del hombre, ha provocado el desplazamiento de estos materiales hacia las depresiones que están constituidas por sedimentos de origen lacustre (Ovalle y Del Pozo, 1994). Los suelos presentan una baja permeabilidad, alta capacidad de retención de humedad y bajas tasas de infiltración (Figura 2.). Esta situación provoca escorrentías superficiales concentradas en los meses de invierno y casi nula en verano (Figura 3.), las cuales crecen y decrecen rápidamente, después de los eventos de precipitación (Selker *et al.*, 2000).



Figura 2. Fisuras típicas que se pueden encontrar en los suelos del secano interior. Se puede observar la fisura se sella con las lluvias (8). Fuente: Stewart *et al.*, 2015.



Figura 3. Río Lonquén a la izquierda en condiciones típicas de verano y a la derecha después de una tormenta en invierno.

Fuente: INIA, 2002.



Según registros de precipitación y escorrentía de la Dirección General de Aguas (1987) el 80% de la precipitación de la cuenca ocurre entre los meses de marzo y agosto, los primeros 100 mm de lluvias no provocan escorrentías, mientras que los primeros 400 mm de lluvia solamente provocan 150 mm de escorrentía (37%), y los últimos 400 mm producen 250 mm de flujo superficial (62%), en promedio anualmente el 47% de la precipitación se traduce en escorrentía superficial. Estos antecedentes, concuerdan con los observados por Selker (2000), Leñam (2000) y Uribe (2002), e indican que las primeras lluvias se infiltran y solamente después de esto se producen los flujos superficiales.

Uribe (2002) realizó balances hidrológicos en dos cuencas del Secano Interior, este estudio demostró que, en el año 2001, aproximadamente el 55% de la precipitación se traduce en escorrentía, el 42% en evapotranspiración de la Cobertura Vegetal y sólo entre 3-4% se convierte en percolación profunda.

## **4.2. Estructura y equipos de medición**

### **4.2.1. Canoa Santa Rita**

Esta obra, debido a su envergadura está construida en hormigón armado (Figura 5.). La descarga que ocurre en esta estructura se establece mediante la siguiente expresión la cual relaciona la altura de escurrimiento en el centro de la canoa ( $H$ ) y el caudal ( $Q$ ) que escurre a través de la sección.

Así:

$$Q = 812,63 \cdot H^3 - 349,79 \cdot H^4 + 65,3 \cdot H^3 + 3,65 \cdot H^2 + 0,01 \cdot H;$$

Para  $H < 0,2$  m.

y

$$Q = 5,41 \cdot H^2 + 2,7 \cdot H - 0,395;$$

Para  $H > 0,2$  m.

Donde:

$Q$  = Caudal en (m<sup>3</sup>/s).

$H$  = Altura de escurrimiento (m).



Figura 5. Canoa Santa Rosa para aforro en Sub-cuenca de 725 ha. Fuente: Uribe *et al.*, 2004.

La estructura de medición está provista de un sensor de presión y loggers que permite almacenar datos y definir la frecuencia de muestreo. Los sensores utilizados los primeros años fueron de tipo DIVER, (Figura 6.), luego fueron cambiados por tipo HOBO U20L.



Figura 6. Sensor de presión conectado a un computador para extraer la información. Fuente: Uribe *et al.*, 2004.

#### **4.2.2. Mediciones de precipitación**

Para la medición de precipitación se utilizan pluviómetros con dataloggers que permiten almacenar datos y extraerlos con computador. El tipo logger utilizado es un Hobo (Figura 7.).





Figura 7. Pluviógrafo utilizado en el punto de medición de precipitación. Fuente: Uribe *et al.*, 2004.

Los datos de precipitación se complementaron y se ajustaron con los entregados por la estación pluviométrica de la Dirección General de Aguas, San Agustín de Puñual ubicada en la comuna de Ninhue.

### **4.3. Metodología**

#### **4.3.1. Sintetizar base de datos**

Se debió ordenar y seleccionar los datos de altura de agua y precipitación para el desarrollo de la investigación medidos por el INIA durante los últimos 20 años para luego obtener los valores de escorrentía para la cuenca de San José. Se seleccionarán eventos de lluvias para cada mes de cada uno de los años para

poder realizar el análisis de los valores de Curva Número obtenidos a partir del siguiente procedimiento:

Se requieren de las siguientes series de datos:

- Datos de precipitación representativa de la cuenca (P)
- Datos de caudales en el cierre de la cuenca (Q)

Procedimiento:

1. Seleccionar eventos de lluvias para cada mes del año.
2. Determinar la escorrentía inmediata asociada a cada evento de lluvias.
3. Determinar volúmenes de escorrentía a partir de las ecuaciones.
4. Usando el área de la cuenca, pasar el volumen de escorrentía inmediata a (mm).
5. El almacenamiento (S) y el parámetro (CN) que se produjo para cada evento se calcula usando:

$$S = 5[P + 2Q - \sqrt{Q(4Q + 5P)}]$$

De la ecuación anterior se obtienen una serie de parámetros CN despejando:

$$CN = \frac{25400}{254+S}$$

Los datos de precipitación son intermitentes por problemas con los equipos de medición, por lo que se realizó relleno estadístico con los datos de la estación pluviométrica de San Agustín en la comuna de Ninhue, manejada por la Dirección General de Aguas.

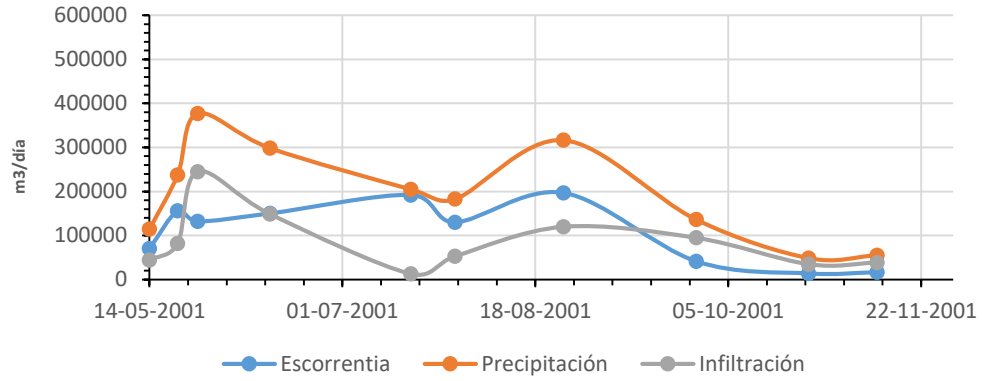
#### **4.3.2. Evolución de la respuesta hidrológica**

Se realizó una correlación entre los posibles cambios de uso de suelo de área de estudio y sus efectos sobre el proceso de escorrentía, generación de caudal y valores de Curva Número (CN). Se debe analizar la evolución a través de los años de los caudales generados en la cuenca de San José y de las precipitaciones para evaluar la influencia de la Mega Sequía en el área de estudio.

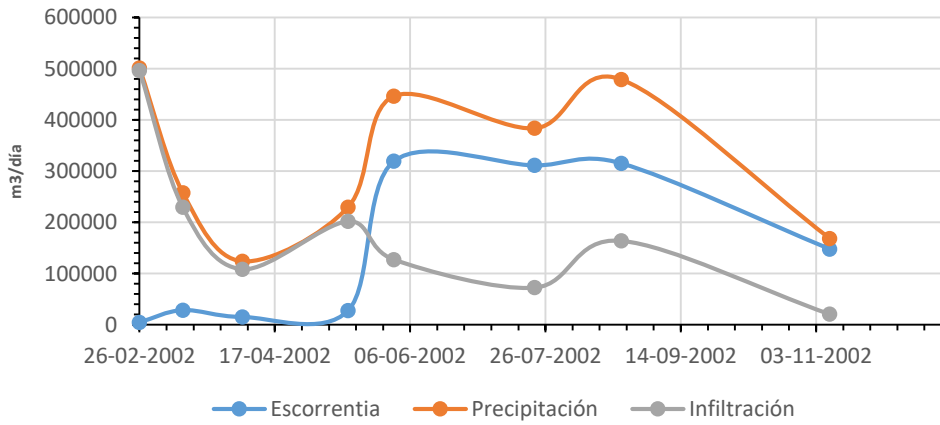
#### **4.4. Resultados**

En la Figura 8, se grafican los valores obtenidos de escorrentía, precipitación e infiltración en el área de la cuenca San José para los años con datos más completos. Se observa que con las primeras precipitaciones del año casi la totalidad del agua se infiltra, luego, cuando el suelo se satura, la infiltración disminuye, y por lo tanto, aumenta la escorrentía en la cuenca cuando hay eventos de lluvia.

## 2001



## 2002



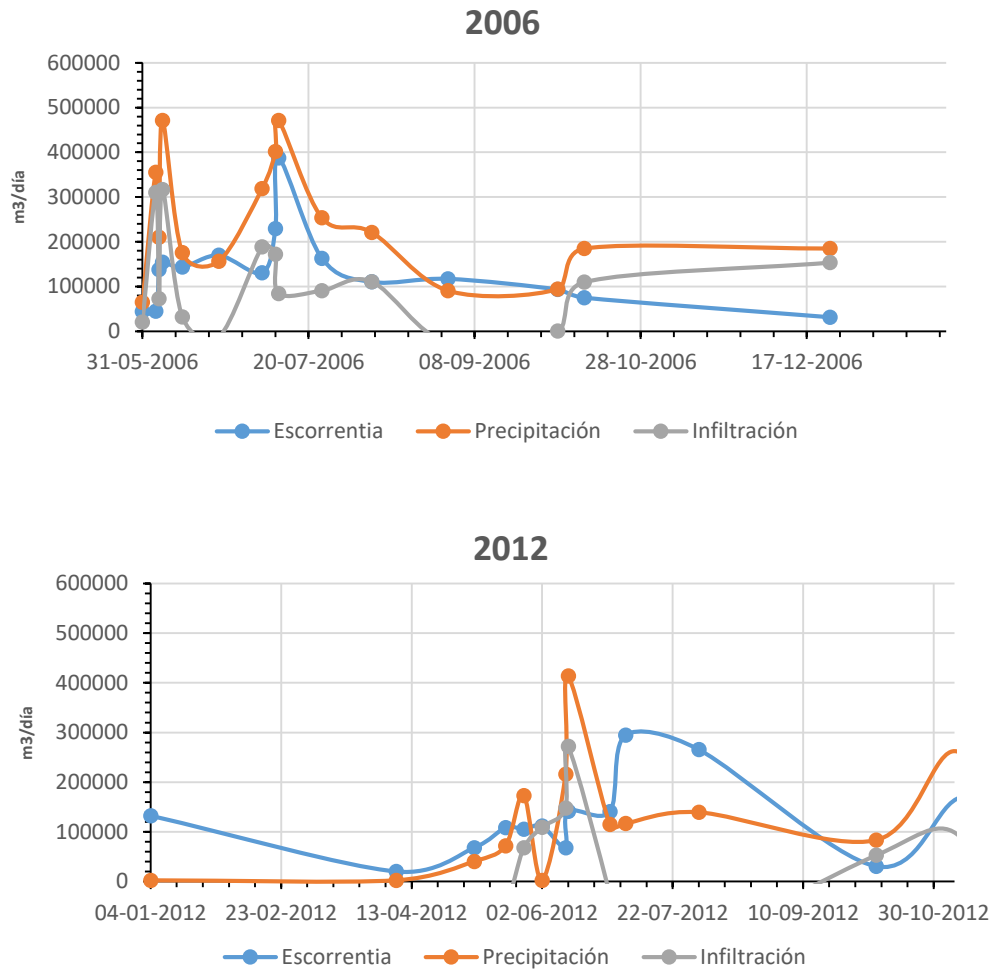


Figura 8. Gráficos de Escorrentía, Precipitación e Infiltración versus m<sup>3</sup>/día para años con base de datos más completa. Fuente: Elaboración propia a partir de datos en línea (CR)<sup>2</sup> (<https://explorador.cr2.cl/>).

Se seleccionaron eventos de tormenta en diferentes estaciones de cada año para obtener los valores de CN, obteniendo permanentemente como resultado el valor 100 como se muestra en la Tabla 2, donde se presentan los valores obtenidos para algunos años como resumen.

Tabla 2. Valores de CN obtenidos para los años 2001, 2002, 2006 y 2012.

2001			2002		
Date	S	CN	Date	S	CN
14-05-2001	0,007	100,0	26-02-2002	0,276	99,9
21-05-2001	0,012	100,0	14-03-2002	0,079	100,0
26-05-2001	0,053	100,0	05-04-2002	0,036	100,0
13-06-2001	0,026	100,0	14-05-2002	0,068	100,0
18-07-2001	0,002	100,0	31-05-2002	0,018	100,0
29-07-2001	0,008	100,0	22-07-2002	0,010	100,0
25-08-2001	0,019	100,0	23-08-2002	0,025	100,0
27-09-2001	0,022	100,0	08-11-2002	0,003	100,0
25-10-2001	0,008	100,0			
11-11-2001	0,009	100,0			
2006			2012		
Date	S	CN	Date	S	CN
31-05-2006	0,003	100,0	04-01-2012	0,000	100,0
04-06-2006	0,102	100,0	07-04-2012	0,000	100,0
05-06-2006	0,011	100,0	07-05-2012	-0,002	100,0
06-06-2006	0,071	100,0	19-05-2012	-0,003	100,0
12-06-2006	0,004	100,0	26-05-2012	0,011	100,0
23-06-2006	-0,001	100,0	02-06-2012	-1,245	100,5
06-07-2006	0,038	100,0	11-06-2012	-1,970	100,8
10-07-2006	0,028	100,0	12-06-2012	-2,613	101,0
11-07-2006	0,011	100,0	28-06-2012	-0,003	100,0
24-07-2006	0,014	100,0	04-07-2012	-0,010	100,0
08-08-2006	0,020	100,0	01-08-2012	-0,009	100,0
31-08-2006	-0,003	100,0	08-10-2012	-2,109	100,8
03-10-2006	0,000	100,0	08-11-2012	-2,307	100,9
11-10-2006	0,022	100,0	02-12-2012	-0,001	100,0
24-12-2006	0,045	100,0			

Las Curvas Número, en teoría, alcanzan valores comprendidos entre 0 y 100. En este caso, como los valores de CN fue el más alto, se traduce a que la cuenca de San José es completamente impermeable en la que toda la precipitación sobre la misma se transforma en escorrentía.

#### **4.5. Comentarios y Conclusiones**

Se constató que no hay una variación en los valores de CN a través de los años, lo que indica que se favorecen los procesos de escorrentía por encima de la infiltración, por lo que se demuestra que en la zona predomina el efecto de comportamiento de los suelos arcillosos expansivos descritos por Stewart *et al.*, (2015).

Por lo anterior, se recomienda realizar acciones para aumentar la infiltración en la cuenca tales como: reforestar las tierras degradadas, ampliar las zonas de bosque y mejorar el tratamiento del terreno en los cultivos mediante planes de conservación de suelos y agua para mantener una buena condición hidrológica.

## **5. CAPITULO 2**

### **5.1. Un análisis simple de la producción de caudal mínimo en cuencas hidrográficas del Secano Interior de Chile**

#### **5.1.2. Área de estudio**

El área de estudio se distribuye en dos regiones de la zona central de Chile: Maule y Ñuble, y comprende parte de lo que se conoce como Secano Interior de Chile Central, que se ubica en la vertiente oriental de la cordillera de la Costa. Esta área ocupa una superficie de 2 millones de hectáreas sometidas a fuertes restricciones ambientales, climáticas y socioeconómicas, donde domina el clima mediterráneo, de estación seca prolongada, con invierno lluvioso, distinguiéndose claramente las cuatro estaciones del año, lo que influye fuertemente en la producción agrícola regional (Mellado, 1992).

Desde el punto de vista de la disponibilidad de agua para una producción agrícola, este territorio, presenta una marcada estacionalidad. La oferta de agua ocurre en el invierno (abril a septiembre en Chile), momento que no corresponde con la demanda, que es durante primavera – verano (octubre a marzo). El suelo, por su alto nivel de degradación, no permite la acumulación de agua para que esté disponible durante el verano. Por lo anterior, diversos autores manifiestan que la producción agropecuaria de secano está sujeta a la provisión natural de



agua como recurso productivo, dependiendo en gran parte de las condiciones climáticas, geomorfológicas y del suelo (Ovalle *et al.*, 1994).

Las tres cuencas estudiadas y representadas en la Figura 9; Purapel, Cauquenes y Lonquén, presentan características similares. Los suelos son de origen granítico, profundos, con perfiles arcillosos densos y muy compactos, de textura franco arcillo arenosa y presencia de cuarzo. Estos suelos poseen bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de fracciones de limo y arcilla. Los suelos que ocupan posiciones altas e intermedias han estado sometidos a una severa acción geológica. Esto sumado a una erosión hídrica acentuada por la acción del hombre, ha provocado el desplazamiento de estos materiales hacia las depresiones que están constituidas por sedimentos de origen lacustre (Ovalle y Del Pozo, 1994). Los suelos presentan una baja permeabilidad, alta capacidad de retención de humedad y bajas tasas de infiltración. Esta situación provoca escorrentías superficiales concentradas en los meses de invierno y casi nula en verano, las cuales crecen y decrecen rápidamente, después de los eventos de precipitación (Selker *et al.*, 2000).

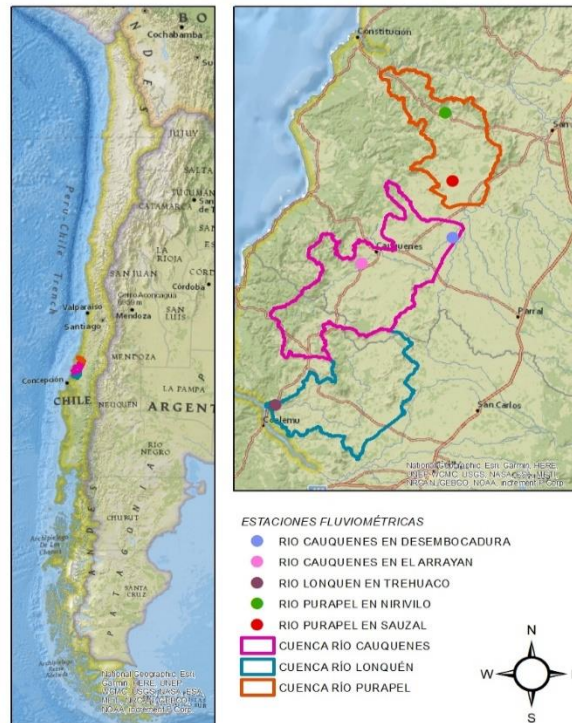


Figura 9. Mapa ubicación cuencas estudiadas. Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGis.

En la Figura 10 se muestra la vegetación del área de estudio que corresponde a formaciones de bosque caducifolio mediterráneo costero y bosque caducifolio mediterráneo interior. Sin embargo, este tipo de vegetación se remite a parches dispersos y crecientemente fragmentados inmersos en una matriz dominante de plantaciones industriales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*, las que han experimentado un explosivo aumento desde mediados de la década de 1970 (Sotomayor, 2017).

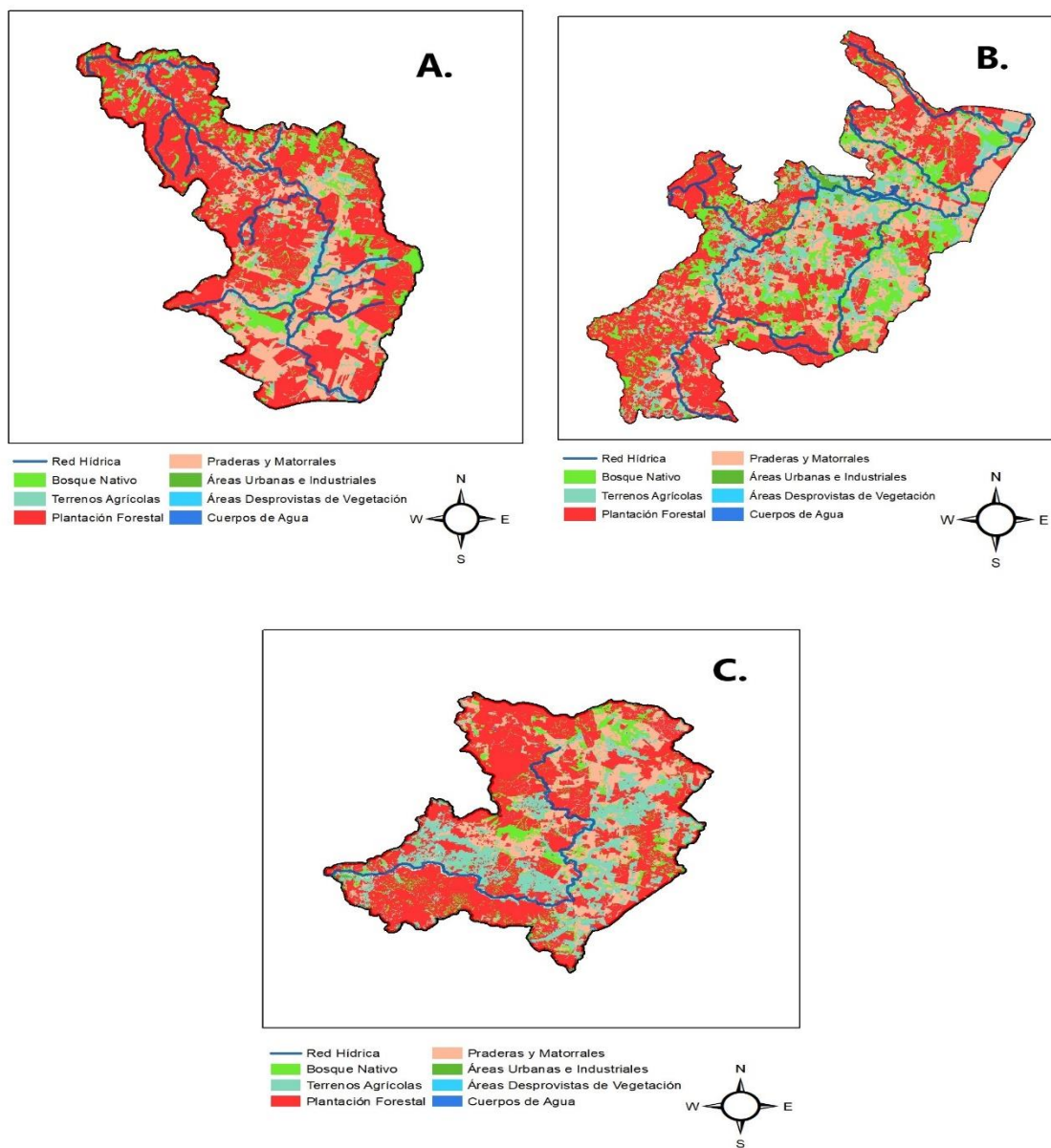
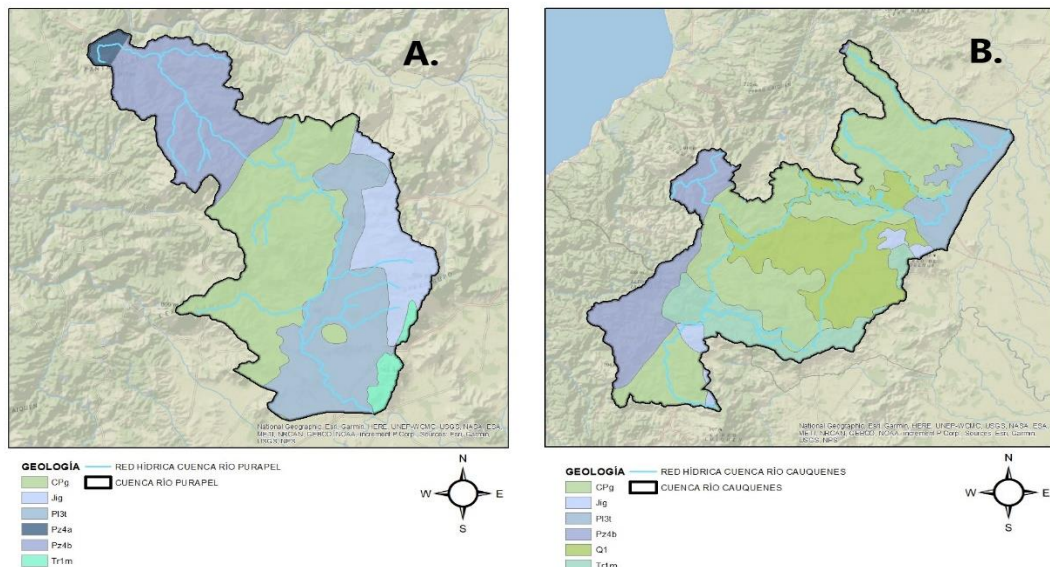


Figura 10. Mapas de uso de suelo: A. Cuenca del río Purapel, B. Cuenca del río Cauquenes, C. Cuenca del río Lonquén. Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGis.

El Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin, 2003) publicó el mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000. En la Figura 11 se puede apreciar que el área de estudio incluye 7 grandes unidades geológicas: CPg, Jlg, PI3t, Pz4a – Pz4b, Q1, y Tr1m. De las cuales, Q1 y PI3t, poseen potencial hidrogeológico medio a alto y las otras unidades geológicas, correspondientes a estructuras de la Cordillera de la Costa, que no poseen mayor potencial hidrogeológico (Mapa Hidrogeológico de Chile (DGA), 1986).



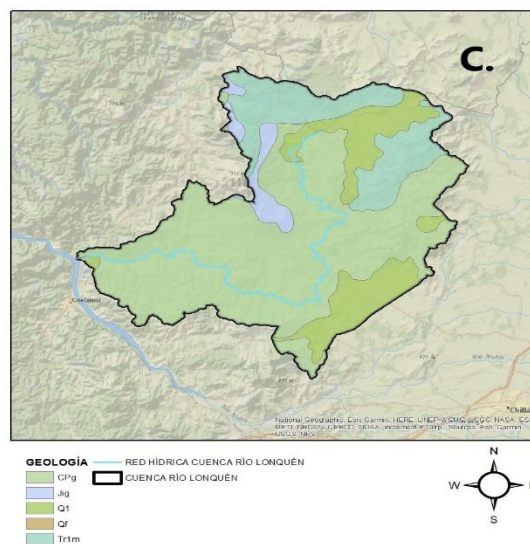


Figura 11. Mapa geológico: A. Cuenca del río Purapel, B. Cuenca del río Cauquenes, C. Cuenca del río Lonquén. Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGis.

El área estudiada presenta un clima templado con una precipitación anual que varía entre los 717 mm en la cuenca de Purapel, 835 mm en la Cauquenes y 873 en la de Lonquén (Sotomayor, 2017). El 80% del agua precipita entre marzo y agosto, y sólo el 15% ocurre entre el período septiembre a noviembre. Esto determina que el agua disponible para los cultivos en promedio dure hasta octubre (Del Pozo, 1999).

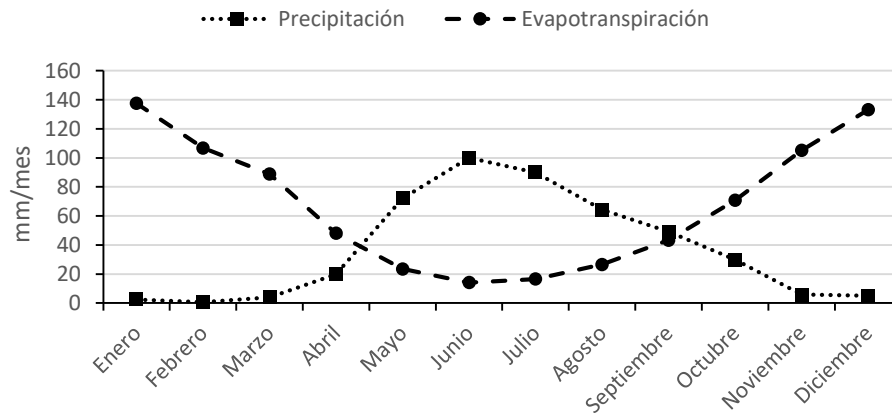


Figura 12. Gráfico variación estacional Precipitación (PP) v/s Evapotranspiración Potencial (ET) de la cuenca río Cauquenes. Fuente: Elaboración propia a partir de datos en línea (CR)<sup>2</sup> (<https://explorador.cr2.cl/>).

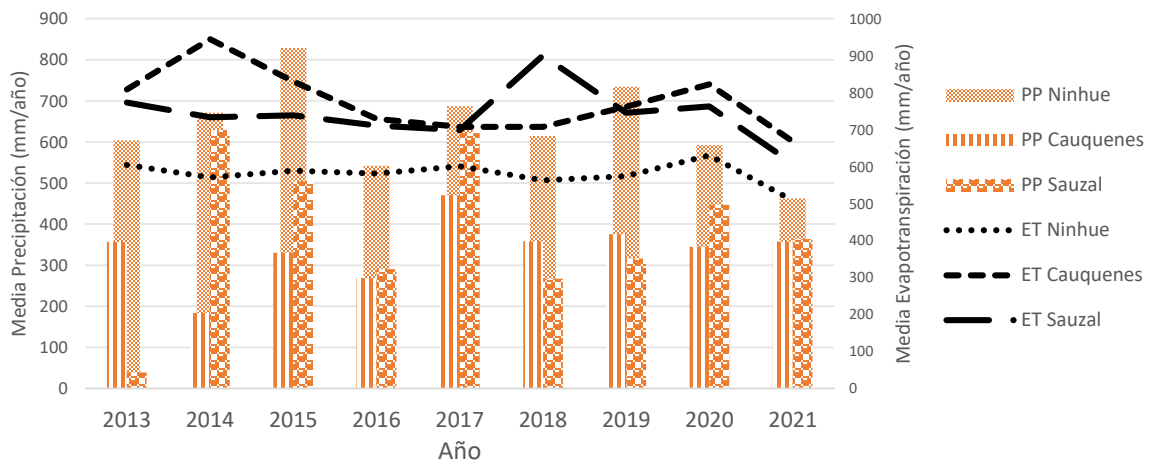


Figura 13. Gráfico variación anual Precipitación (PP) v/s Evapotranspiración Potencial (ET) de cuencas del Secano Interior. Fuente: Elaboración propia a partir de datos en línea (CR)<sup>2</sup> (<https://explorador.cr2.cl/>).

## 5.2. Metodología

Por medio de la plataforma Camels manejada por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (Alvarez-Garreton *et al.*, 2018) se obtuvieron los datos de caudal y de precipitación medidas en las 5 estaciones fluviométricas presentes en las 3 cuencas analizadas. Se revisó detalladamente los datos entre los años 1987 y 2013 para detectar posibles errores en las mediciones que influyeran en los resultados de las gráficas de CD.

Para efectuar el análisis de las curvas FDC, se revisaron los datos para determinar si valores nulos correspondían a errores de la base de datos o a que efectivamente el río se había secado. En el primer caso, los errores se corrigieron mediante regresiones entre las estaciones que poseen datos. En el segundo caso, cuando el caudal es nulo, se usó un valor  $10^{-5}$  para permitir el análisis de los datos usando una transformación logarítmica.

Para obtener las CD se graficaron los datos de caudal en el eje de las ordenadas, en escala lineal, y la frecuencia de excedencia en el eje de las abscisas, en escala logarítmica. Los caudales se estandarizaron por el área de monitoreo que abarca cada estación fluviométrica en las cuencas, para facilitar la comparación por la diferencia de tamaños.

Tabla 3. Datos de área de monitoreo por estación fluviométrica.

Nombre Estación	Área Cuenca	Ubicación
Estación Purapel en Nirivilo	262,8 km <sup>2</sup>	Región del Maule
Estación Purapel en Sauzal	404,3 km <sup>2</sup>	Región del Maule
Estación Cauquenes en Arrayan	622,1 km <sup>2</sup>	Región del Maule
Estación Cauquenes en Desembocadura	1637,5 km <sup>2</sup>	Región del Maule
Estación río Loquén en Trehuaco	1160 km <sup>2</sup>	Región de Ñuble

Fuente: Elaboración propia a partir de datos en línea.

Se analizó la relación entre los percentiles de excedencia Q25 y Q75 definida por Watson (1965, en Singer y Cheng, 2002) y trabajada por Paez (2021) y aplicable a ríos con flujo permanente, para identificar la importancia relativa del aporte del flujo de base para el sostenimiento de los caudales en tiempo de estío. Este indicador se calcula originalmente mediante la siguiente expresión:

$$(Q_{25}/Q_{75})^{1/2}$$

Un menor valor de esta relación indica mayor aporte de componente de agua subterránea.



### 5.3. Resultados y Discusiones

Se estudiaron las Curvas de Duración (CD) para 5 estaciones fluviométricas ubicadas en cuencas de la zona del Secano Interior de Chile.

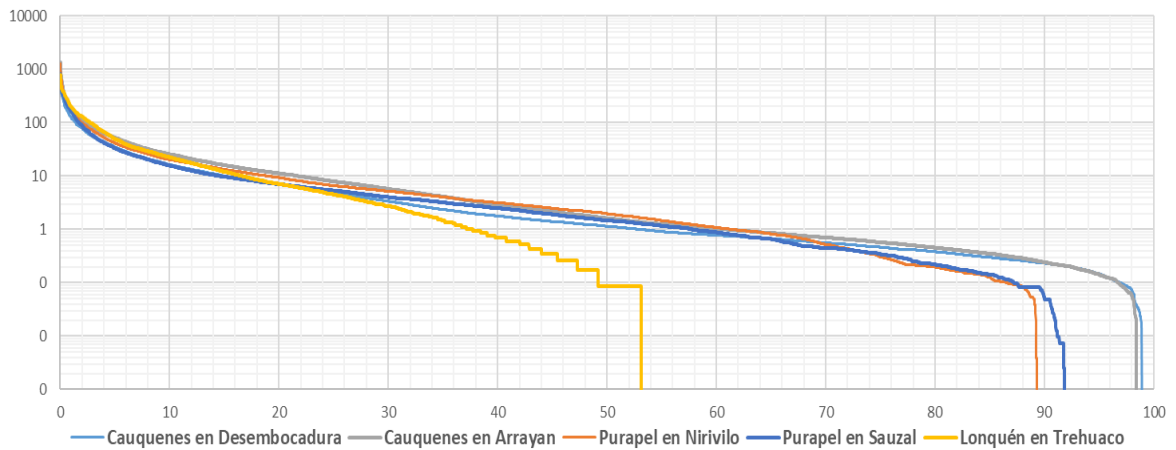


Figura 14. Curvas de Duración obtenidas para los años 1987 – 2013 para las 5 estaciones fluviométricas analizadas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos en línea (CR)<sup>2</sup> (<https://explorador.cr2.cl/>).

Cada uno de los ríos analizados del Secano Interior presenta un % del tiempo con caudal nulo, pero la duración del periodo seco varia.

Dado que las características de los suelos existentes, y el régimen de precipitaciones en las cuencas son similares, la diferencia en el periodo de caudal nulo se debe explicar por otra razón.

Curvas con un gradiente suave, como lo son las de Purapel y Cauquenes, indican una contribución relevante del almacenamiento subterráneo a la esorrentía de cauces, mientras que gradientes pronunciados, como la de Lonquén, indican una mayor variabilidad diaria de descargas (Q) y corresponden, típicamente, a cuencas de sustrato litológico impermeable, con bajo almacenamiento, y rápida respuesta a las precipitaciones.

En las cuencas de los tres ríos analizados existen unidades geológicas con un bajo o nulo potencial de acumulación de aguas subterráneas y dos tipos de formaciones con potencial de almacenamiento de agua subterráneas (DGA, 1986) que corresponden a depósitos sedimentarios no consolidados producidos durante los últimos períodos glaciales que afectaron a parte del territorio durante el Pleistoceno-Holoceno (Q1) y a material piroclástico transportadas hacia el valle por el colapso de calderas volcánicas (PL3t) (Sernageomín, 2003).

Al analizar la figura 15 se observa que la mayor diferencia entre las cuencas de los ríos analizados se produce por la existencia de unidades acuíferas que almacenen agua y que la aportan al río durante períodos de estiaje (PI3t y Q1).

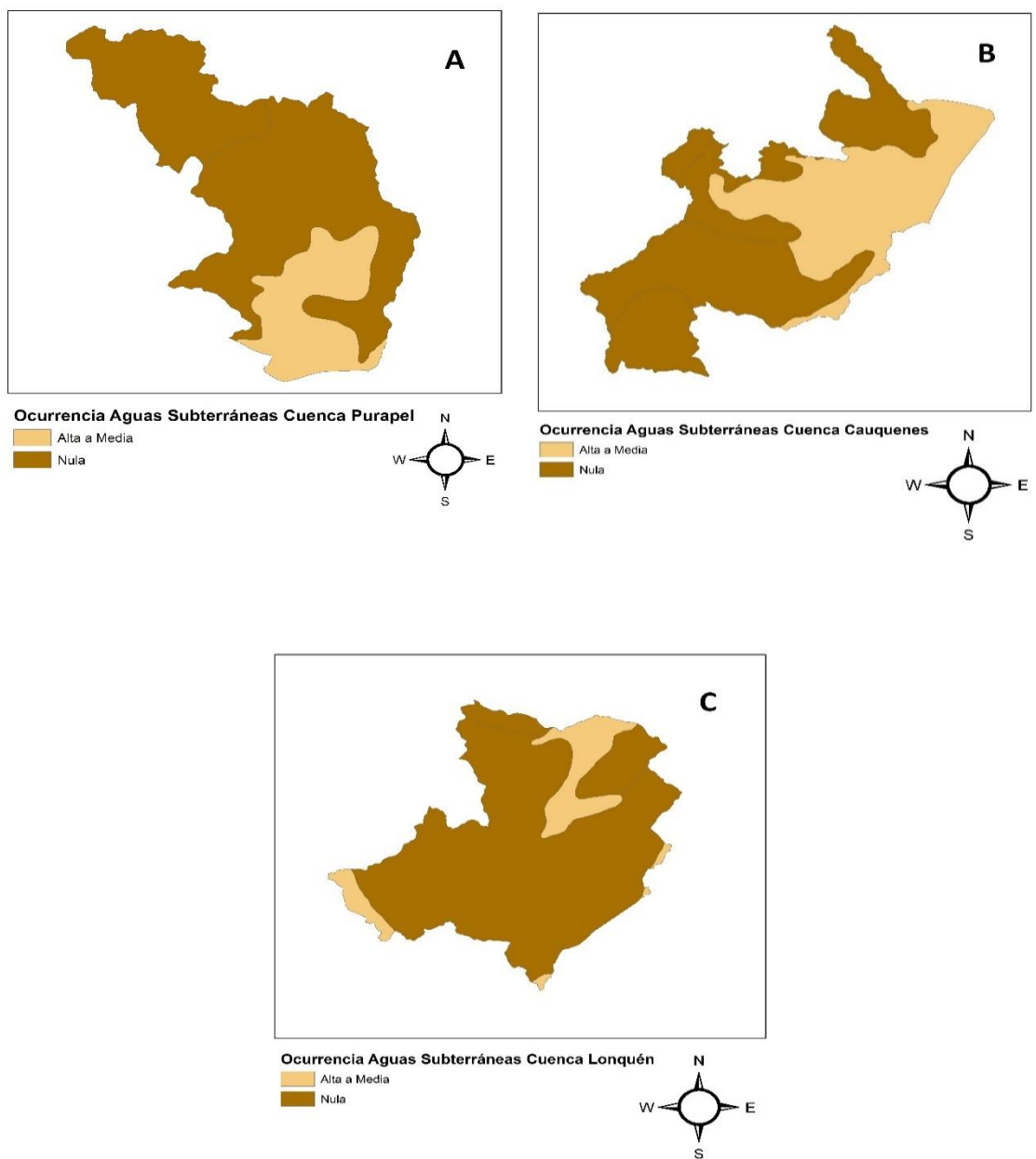


Figura 15. Mapa Ocurrencia Aguas Subterráneas: A. Cuenca del río Purapel, B. Cuenca del río Cauquenes, C. Cuenca del río Lonquén. Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGis.

La métrica usada por Paez (2021) para analizar el aporte de la componente de aguas subterráneas consiste en determinar la relación entre los caudales asociados al 25% y 75% del tiempo. Si bien es cierto que para las cuencas de los ríos Purapel y Cauquenes esta métrica puede ser utilizada; en el caso del río Lonquén  $(Q_{25}/Q_{75})^{1/2}$ , no es aplicable pues este río se seca casi el 45% del tiempo.

En ese caso, una propuesta de métrica simple sería sólo considerar el porcentaje del tiempo que el río está seco. Para un río de régimen pluvial, eso podrá ser considerado como un indicador de la limitación de aportes de agua subterránea.

Tabla 4. Resultados métrica original usada por Paez (2021) y modificada.

Estación / Cuenca	$(Q_{25}/Q_{75})^{1/2}$
Purapel en Nirivilo	4,650
Purapel en Sauzal	3,942
Cauquenes en Arrayan	3,725
Cauquenes en Desembocadura	3,210
Lonquén en Trehuaco	n/a

Fuente: Elaboración propia a partir de métrica original usada por Paez (2021) y modificada.

La cuenca del Lonquén muestra una mayor diferenciación en el comportamiento de los caudales mensuales, en relación a las cuencas Purapel y Cauquenes, cuyos registros de los meses de estío son más parejos.

En los resultados de la Figura 14 se observa un trazado semi-paralelo para las cuencas de Purapel y Cauquenes a lo largo de la mayor parte de ambas CD, con diferencias en el extremo de caudales más bajos, por sobre la probabilidad de 80% de excedencia. No así para la cuenca de Lonquén que presenta el mayor descenso observado, donde la CD supera apenas el 50% de probabilidad de excedencia, lo que refleja una mayor sensibilidad del cauce al período de estiaje, acusando que ésta última cuenca tiene más días en el año sin flujo de agua que las de Purapel y Cauquenes.

La Tabla 4 muestra los resultados de la métrica usada por Paez (2018), que fue propuesta por Walton (1965) para la estimación de la importancia en el aporte subterráneo al sostenimiento de la escorrentía. Un valor mayor de este índice representa una mayor proporción de la componente subterránea en la escorrentía del curso fluvial. Se observa que las cuencas de los ríos Purapel y Cauquenes poseen un mayor aporte de aguas subterráneas, en comparación con la cuenca del Lonquén. Esto indica que la descarga desde el almacenamiento subterráneo fue más relevante para el sostenimiento del flujo superficial en el período de años analizados (entre 1987 y 2013).

En cuanto a la precipitación, la cuenca del Lonquén presenta en sus registros mayor cantidad de precipitaciones en el año en comparación a las cuencas del Purapel y Cauquenes; y una menor ET anual, pero aun con estas condiciones su curso presenta un flujo intermitente, con una evidente ausencia de éste en el periodo estival. En este sentido, cabe preguntarse por qué la cuenca del Lonquén, que presenta mayor cantidad de precipitaciones y una menor ET en comparación a las cuencas del Purapel y Cauquenes, corresponde a una cuenca con flujo intermitente con menor un menor volumen de escorrentía. Se sugiere que la diferencia en los sustratos geológicos presentes en estas cuencas determina el flujo de escorrentía; las cuencas del Purapel y Cauquenes presentan sustratos geológicos permeables y con reconocido potencial de almacenamiento de aguas subterráneas lo que explica el mayor aporte al cauce según los resultados de la métrica usada por Paez (2021).

#### **5.4. Conclusiones**

Los resultados obtenidos por medio del análisis de la CD son coherentes en señalar que las cuencas del Purapel y Cauquenes muestra una mayor dependencia del aporte desde el almacenamiento subterráneo al sostenimiento de la escorrentía anual y estival, comparada con la cuenca del Lonquén.

Si bien todos los ríos estudiados son intermitentes y sus cuencas poseen suelos arcillosos expansivos, las diferencias existentes entre las tres cuencas en

estudios explican la diferencia en el comportamiento de la esorrentía. Las cuencas de los ríos Purapel y Cauquenes poseen sistemas acuíferos que están conectados a los ríos y por lo tanto, mantienen la descarga de caudales mínimos en el período de estiaje.

## **6. CAPITULO 3**

### **6.1. Conclusiones generales**

Un problema común que afecta a toda el área del Secano Interior es la baja productividad de la tierra como resultado de un proceso de pérdida progresiva de los recursos naturales. Es decir, a medida que transcurren los años, los suelos son menos fértiles, los bosques nativos están disminuyendo y/o desapareciendo, y la capacidad de retención de agua de los suelos ha ido bajando.

La obtención del parámetro CN es factible teniendo los datos de precipitación, altura de agua medida por las canoas de aforo y la curva de descarga de la canoa. En el caso del estero San José, se produce una cierta incertidumbre al no tener datos completos en ciertos meses para así poder seleccionar un evento de lluvias y obtener el parámetro.

De acuerdo a la hipótesis de este trabajo, se esperaba obtener diferencias en los valores de CN para el transcurso de los años, pero éstos no variaron, con lo que se rechaza la hipótesis, concluyendo que la característica de los suelos degradados predomina en una pequeña cuenca.

El análisis de la Curva de Duración (CD) mostró que las cuencas estudiadas (Purapel, Cauquenes y Lonquén) acusan su menor caudal durante el mes de febrero, siguiendo el régimen de precipitaciones, aunque la cuenca del río



Lonquén acusa una mayor disminución de caudales entre los meses estivales, los que se interpreta como una mayor sensibilidad ante el efecto estival. Se sugiere que, el efecto de disminución acusada del caudal del cauce se debe a que esta cuenca no posee aportes de sistemas acuíferos que aporten al flujo base.

En cuanto a las cuencas de Purapel y Cauquenes, los análisis permitieron diagnosticar que la esorrentía durante estiaje es mantenida por la descarga desde el medio subterráneo.

## 7. REFERENCIAS

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A.: The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018> , 2018.

Basile, H.; Seguis, L.; Hiderer, J.; Cohard, J.; Wubda, M.; Descloitres, M.; Benarrosh, N.; Boy, J. Water storage changes as a marker for base flow generation processes in a tropical humid basement catchment (Benin): Insights from hybrid gravimetry. *Water Resour. Res.* 2015, 51, 8331–8361.

Del Pozo, Del Canto, 1999. Áreas Agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII región, Serie Quilamapu N° 113, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, Chillán, Chile, 116 p.

DGA. 1986. Mapa hidrogeológico de Chile : texto explicativo, escala 1:2.500.000. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 8 pp.

Gaspari F.; G. Senisterra y R. Marlats. 2007. Relación precipitaciónescorrentia y numero de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. *Rev. FCA UNcuyo.* 1(39): 21-28.

Gmati Sonia, Norio Tase, Maki Tsujimura and Yuki Tosaki: “Aquifers Interaction in the outhwestern Foot of Mt. Fuji, Japan, Examined through Hydrochemistry and Statistical Analyses”, *Hydrological Research Letters*, Vol. 5, pp.58-63, (2011).

Mellado, M. 1992. Manual Producción de Trigo en el Secano Interior VII y VIII Región, Serie Quilamapu N°39, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, Chillán, Chile. Available at <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/38048>

Morales, L. 2016. Caracterización hidroclimatológica y del uso de suelo del Secano de la Región de O'Higgins. 5 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 320. Rengo, Chile.

Muñoz-Villers, L. E., and J. J. McDonnell (2012), Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate, *Water Resour. Res.*, 48, W09528, doi:10.1029/2011WR011316.

Ovalle C. y A. Del Pozo, 1994. La agricultura del secano Interior. 234 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, Chillán, Chile.

Paez, D., Arumi, J.L., Paredes J., 2021. Caracterización de la Dinámica Hidrogeológica Mediante el Análisis de la Escorrentía Estival y la Descomposición del Hidrograma de Escorrentía en dos Cuencas de Chiloé. *Aqua-LAC Volumen 13(2) Marzo 2021 -Septiembre2021*doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-2-02.

Parra, V., J. L. Arumí, E. Muñoz, J. Paredes. 2019. Characterization of the groundwater storage systems in south-central Chile: An approach based on recession flow analysis. *Water* 2019, 11, 2324; doi:10.3390/w11112324.

Ramírez, J. 2002. Peasant rationality and land cover changes in the central drylands of Chile. Thesis Ph. D. in Geography. University of Nebraska-Lincoln, USA. 189 p.

Selker, J.; D. Rupp; M. Leñam; H. Uribe, 2000. Estudio Hidrológico en el Secano Interior. Resultados Preliminares del Proyecto Piloto en Portezuelo. Informe Técnico de Riego. 41 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, Chillán, Chile.

SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.

Sotomayor, B. 2017. Analisis de la relación entre dinámica de la configuración

del paisaje y la respuesta hidrológica a escala de cuenca en dos cuencas forestales del secano interior de la región del Maule. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Pregrado. Santiago, Chile. Available at <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151007>.

Stewart RD; Majdi R; Najm A; Rupp DE; Lane JW; Uribe HC; Arumí JL; Selker JS. 2015. Hillslope runoff thresholds with shrink-swell clay soils. *Hydrol. Process.* 29(4), 557–571 (2015). DOI: 10.1002/hyp.10165.

Thomas, B.F.; Vogel, R.M.; Kroll, C.N.; Famiglietti, J.S. Estimation of the baseflow recession constant under human interference. *Water Resour. Res.* 2013, 49, 7366–7397.

Uribe, H. 2016. Caracterización Hidroclimatológica y del Uso de Suelo del Secano de la Región de O'Higgins. 105 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 320. Rengo, Chile.

Uribe H., J. L. Arumí, L. González, L. G. Salgado. 2003. Balances hidrológicos para estimar recarga de acuíferos en el Secano Interior, Chile. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*. Volumen XVIII, n° 3 de julio-septiembre de 2003. Pp. 17-28.

Uribe C., Hamil; Pérez C., Claudio y Okuda, Yukio. 2004. Boletín Recursos Hídricos y Manejo del agua para un Desarrollo Sustentable del Secano. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 123. Versión Digital.