

**Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**



**Evaluación de la Evapotranspiración por Teledetección
para Modelación Hidrológica de Cuencas Hidrográficas**

Por

Israel Hernán Acuña Mesa

Trabajo de Título para optar al Grado de
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de
Ingeniero Civil

Profesora Guía Yerel Morales Pino

Diciembre, 2020

Índice

Ítem	Pág.
Facultad de Ingeniería.....	1
Escuela de Ingeniería Civil.....	1
Evaluación De La Evapotranspiración Por Teledetección Para Modelación Hidrológica De Cuencas Hidrográficas	1
Índice.....	2
Lista de Abreviaturas o Siglas.....	6
Lista de Símbolos.....	8
Lista de Figuras.....	12
Lista de Tablas.....	14
Capítulo 1	17
Introducción.....	17
1.1. Planteamiento del problema.....	17
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. Objetivos generales.....	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Organización del documento.....	19
Capítulo 2	20
Marco teórico.....	20
2.1. Proceso de evapotranspiración	20
2.1.1. Evaporación.....	20
2.1.1.1. Poder evaporante de la atmósfera.....	20
2.1.1.2. Superficie evaporante	21
2.1.1.3. Disponibilidad del agua	21
2.1.2. Transpiración.....	21
2.1.2.1. Condiciones hidrometeorológicas	22
2.1.2.2. Características de cultivo	22
2.1.3. Evapotranspiración.....	22
2.1.3.1. Evapotranspiración de referencia	23
2.1.3.2. Evapotranspiración de cultivo	23
2.1.3.3. Evapotranspiración real.....	24
2.1.3.4. Actual Evapotranspiration	24
2.2. Enfoque Hidrológico	24
2.3. Enfoque Energético	25

2.4.	Estimación de la evapotranspiración	27
2.4.1.	Instrumental de monitoreo	27
2.4.1.1.	Sistema de covarianza de flujos turbulentos (<i>Eddy Covariance</i>).....	28
2.4.1.2.	Torres de flujo (<i>Eddy Flux Tower</i>)	28
2.4.1.3.	Lisímetros	29
2.4.1.4.	Evaporímetro de estaque o bandeja	29
2.4.1.5.	Atmómetro	30
2.4.2.	Expresión empírica.....	30
2.4.2.1.	Parámetros asociados a la temperatura del aire	31
	• Temperatura Media del Aire:.....	31
	• Presión Media de Vapor de Saturación:	31
	• Presión Real de Vapor:	32
	• Flujo de Calor del Suelo para Periodos Mensuales:	32
	• Pendiente de la Curva de Presión de Vapor:.....	32
2.4.2.2.	Parámetros asociados a la radiación	32
	• Radiación Neta:.....	32
	• Radiación Neta de Onda Corta:	33
	• Radiación Neta de Onda Larga:.....	33
	• Radiación Solar en Día Despejado:	33
	• Radiación Extraterrestre para Periodos Diarios:.....	33
2.4.2.3.	Parámetros asociados al viento	34
	• Velocidad del Viento:.....	34
2.4.3.	Imágenes satelitales.....	34
2.5.	Modelación hidrológica	35
2.5.1.	Modelo WEAP	35
2.5.2.	Método de humedad del suelo	36
2.6.	Indicadores de bondad de ajuste.....	37
2.6.1.	Criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe	37
2.6.2.	Criterio de sesgo porcentual (PBIAS)	38
2.6.3.	Criterio de eficiencia de Kling-Gupta.....	38
Capítulo 3	.....	39
Metodología	.....	39
Capítulo 4	.....	41
Caracterización de la zona de estudio	.....	41
4.1.	Cuenca estero Curiperumo en lo Hernández	42
4.1.1.	Clima e hidrología	42

4.1.2.	Derechos de agua	44
4.1.3.	Hidrogeología	44
4.1.4.	Topografía	44
4.1.5.	Uso de suelo.....	46
4.2.	Cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	47
4.2.1.	Clima e hidrología	47
4.2.2.	Derechos de agua	49
4.2.3.	Hidrogeología	49
4.2.4.	Topografía	49
4.2.5.	Uso de suelo.....	51
4.3.	Información disponible	52
4.3.1.	Información meteorológica	52
4.3.2.	Distribución espacial de variables meteorológicas	55
4.3.3.	Información fluviométrica	56
4.3.4.	Información por teledetección	56
Capítulo 5	.....	58
Modelación hidrológica.....		58
5.1.	Conceptualización del modelo.....	58
5.1.1.	Modelo estero Curipeumo en lo Hernández	58
5.1.2.	Modelo río Perquilauquén en San Manuel.....	61
Capítulo 6	.....	63
Resultados		63
6.1.	Resultados cuenca estero Curipeumo en lo Hernández	63
6.1.1.	Instrumental de monitoreo.....	63
6.1.2.	Expresión empírica.....	64
6.1.3.	Imágenes satelitales.....	65
6.1.4.	Modelación hidrológica.....	66
6.2.	Resultados cuenca río Perquilauquén en San Manuel	69
6.2.1.	Instrumental de monitoreo.....	69
6.2.2.	Expresión empírica.....	70
6.2.3.	Imágenes satelitales.....	70
6.2.4.	Modelación hidrológica.....	71
Capítulo 7	.....	74
Análisis de resultados		74
7.1.	Instrumental de monitoreo	74
7.2.	Expresión empírica	75

7.3. Modelación hidrológica	75
7.3.1. Análisis del problema	76
7.3.2. Solución del problema	78
7.4. Tasas de evapotranspiración.....	84
7.4.1. Evapotranspiración de referencia	84
7.4.2. Evapotranspiración de cultivo	85
7.4.3. Evapotranspiración.....	86
7.4.4. Discusión de tasas de evapotranspiración.....	87
7.5. Evaluación de la evapotranspiración por teledetección	92
Capítulo 8	97
Conclusiones y comentarios	97
Referencias bibliográficas	99
Anexo 1: Derechos de agua.....	106
Apéndice 1: Acuíferos de la cuenca Río Maule	107

Lista de Abreviaturas o Siglas

AGR = Uso de Suelo agrícola.

ASCE = American Society of Civil Engineers.

BOS = Uso de suelo forestal.

CAMELS-CL = Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset.

CONAF = Corporación Nacional Forestal.

CR2 = Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia.

DEM = Modelo Digital de Elevación.

DGA = Dirección General de Aguas

DMC = Dirección Meteorológica de Chile.

EC = Explorador Climático.

Eddies = Torbellinos en fluidos.

EEFLUX = Earth Engine Evapotranspiration Flux.

Epan = Evaporación del tanque evaporímetro.

ET = Evapotranspiración.

ETa = Actual Evapotranspiración.

ETc = Evapotranspiración de Cultivo.

ETo = Evapotranspiración de Referencia.

ETr = Evapotranspiración Real.

EWRI = Environmental & Water Resources Institute.

FAO = Food and Agriculture Organization of the United Nations.

INIA = Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Kc = Coeficiente de Cultivo.

KGE = Eficiencia de Kling-Gupta.

Kpan = Coeficiente del tanque evaporímetro.

LAT = Latitud.

LON = Longitud

M.S.N.M. = Metros sobre el nivel del mar.

MODIS = Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer.

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

NSE = Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

NSElog = Eficiencia de Nash-Sutcliffe Logaritmica.

ODEPA = Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.

P. = Parámetro

PBIAS = Criterio del Sesgo Porcentual.

PM = Uso de Suelo Praderas y Matorrales.

SV = Uso de Suelo Sin Vegetación

U = Uso de suelo Urbano

U.H. = Unidad Hidrológica

U.S. = Uso de Suelo

WEAP = Water Evaluation and Planning System.

Lista de Símbolos

ϑ = Déficit Higrométrico.

e_s = Presión de vapor saturado.

e_a = Presión de vapor del aire.

E = Tasa de Evaporación.

K = Factor meteorológico.

ET_c = Evapotranspiración de cultivo.

K_c = Coeficiente de cultivo.

ET_o = Evapotranspiración de referencia.

$I(t)$ = Variable de Entrada en función del tiempo.

$Q(t)$ = Variable de Salida en función del tiempo.

$\partial V / \partial t$ = Tasa de cambio de almacenamiento en función del tiempo.

P = Precipitación

Q_{sup} = Caudal por aguas superficial de entrada y salida o Caudal de Escorrentía Superficial.

Q_{sub} = Caudal por aguas subterráneas de entrada y extracción.

E = Evaporación.

T = Transpiración.

∂V_{sup} = Variación del volumen de agua superficial.

∂V_{sub} = Variación del volumen de agua subterráneas.

∂V_{niv} = Variación del volumen nival.

ET = Evapotranspiración.

R_n : = Radiación Neta.

G = Flujo de calor del suelo.

H = Flujo de calor sensible.

λET = Flujo de calor latente.

β = Razón de Bowen.

Δt = Diferencia de temperatura del aire entre dos niveles de elevación.

Δe = Diferencia de presión de vapor entre dos niveles de elevación.

γ = Constante psicrométrica.

K_p = Coeficiente del tanque evaporímetro.

E_{pan} = Evaporación del tanque evaporímetro.
 \bar{T} = Temperatura media del aire a 2m de altura.
 U_2 = Velocidad del viento a 2m de altura.
 Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor.
 T_{max} = Temperatura máxima del aire.
 T_{min} = Temperatura mínima del aire.
 $e^{\circ}(T)$ = Presión de saturación de vapor a temperatura del aire
 $\exp(..)$ = 2,7183 (Base del logaritmo natural elevado a la potencia (..).
 T_{rocio} = Temperatura del punto de rocío.
 T_{max} = Temperatura máxima del aire.
 T_{min} = Temperatura mínima del aire.
 HR_{max} = Humedad relativa máxima.
 HR_{min} = Humedad relativa mínima.
 $G_{(mes,i)}$ = Flujo de calor de suelo en el mes i.
 $\bar{T}_{(mes,i+1)}$: Temperatura media del aire en el mes i+1.
 $\bar{T}_{(mes,i-1)}$: Temperatura media del aire en el mes i-1.
 R_{ns} = Radiación neta de onda corta.
 R_{nl} = Radiación neta de onda larga.
 R_{ns} = Radiación neta de onda corta.
 α = Coeficiente de reflexión del cultivo o albedo
 R_s = Radiación solar entrante.
 σ = Constante de Stefan-Boltzmann.
 $\bar{T}_{(max,k)}$ = Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas.
 $\bar{T}_{(min,k)}$ = Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas.
 R_{so} = Radiación solar en día despejado.
 R_a = Radiación extraterrestre.
 Z = Elevación de la estación sobre el nivel del mar.
 G_{sc} = Constante solar
 d_r = Distancia relativa inversa Tierra-Sol
 J = Número del día en el año
 ω_s = Ángulo de radiación a la puesta del sol

ϕ = Latitud

δ = Declinación solar.

U_z = Velocidad del viento medida a Z m sobre la superficie.

Km = Kilómetros.

S_{wj} = Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces.

$Z_{(1,j)}$ = Nivel de humedad en la zona de raíces.

P_e = Precipitación efectiva.

PET = Evaporación potencial cultivo referencia, estimación de Penman-Montieth.

$k_{(c,i)}$ = Coeficiente de cultivo para las diferentes porciones de cobertura de suelo.

RRF_J = Índice de resistencia a la escorrentía para cada cobertura de suelo.

K_s = Conductividad de zona de raíces.

F_j = Dirección preferencial de flujo.

D_{wj} = Capacidad de almacenamiento en la zona profunda.

$Z_{(2,i)}$ = Nivel de humedad en la zona profunda.

K_d = Conductividad de zona profunda.

NSE = Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

NSELog = Eficiencia de Nash-Sutcliffe Logaritmica.

Y_i^{obs} = Valor observado en el tiempo i.

Y_{obs}^{media} = Valor observado medio.

Y_i^{sim} = Valor simulado en el tiempo i.

PBIAS = Sesgo Porcentual.

KGE = Eficiencia de Kling-Gupta.

Mt = Metros.

km^2 = Kilómetros Cuadrados.

m.s.n.m. = Metros sobre el nivel del mar.

m/m = Metros por metro lineal.

$^{\circ}C$ = Grados Celsius.

m/s = Metros por segundo.

$kWh/m^2/día$ = Kilowatt hora por metro cuadrado al día.

mm= Milímetros.

m^3/s = Metro cúbicos por segundo.

$m^2/día$ = Metros cuadrados por día.

r = Coeficiente de correlación lineal entre valores simulados y observados.

α = Razón entre la desviación estándar simulada y observada.

β = Razón entre el promedio simulado y observado.

X = Variable Meteorológica.

i = Estación de monitoreo completa.

j = Estación de monitoreo incompleta.

$\alpha_{(i,j)}$ = Parámetro de la regresión lineal, pendiente.

$\beta_{(i,j)}$ = Parámetro de la regresión lineal, intercepto.

x = Altitud.

y = Precipitación.

R^2 = Coeficiente determinístico.

% = Porcentaje.

α = Coeficientes de reflexión del cultivo.

K_p = Coeficientes estanque evaporímetro.

$K_{(RS)}$ = Coeficiente de Ajuste (0,16-0,19).

PC = Punto de congelamiento.

PF = Punto de Fusión.

ΔS = Variación de almacenamiento de la cuenca.

Q^* = Caudal de Escorrentía Superficial de salida de la cuenca.

$mm/día$ = Milímetros por día.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Sistema de covarianza de flujos turbulentos	28
Figura 2.2 – Torres de flujo, conjunto de dispositivos de medición	28
Figura 2.3 – Estación de monitoreo meteorológico con lisímetro	29
Figura 2.4 – Evaporímetro de estanque circular	30
Figura 2.5 – Elementos hidrológicos modelados en <i>WEAP</i>	36
Figura 3.1 – Metodología para la evaluación de la evapotranspiración por teledetección para modelación hidrológica a nivel de cuencas hidrográficas.	39
Figura 4.1 – Ubicación de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	42
Figura 4.2 – Hidrografía de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	43
Figura 4.3 – Curva de variación estacional de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, periodo 1960-2016.	44
Figura 4.4 – Curva hipsométrica de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	45
Figura 4.5 – Bandas de elevación de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	45
Figura 4.6 – Uso de suelos de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	46
Figura 4.7 – Ubicación de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	47
Figura 4.8 – Hidrografía de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	48
Figura 4.9 – Curva de variación estacional de cuenca río Perquilauquén en San Manuel, periodo 1960-2016.	49
Figura 4.10 – Curva hipsométrica de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	50
Figura 4.11 – Bandas de elevación de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	50
Figura 4.12 – Uso de suelos de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	51
Figura 4.13 – Estaciones meteorológicas disponibles, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	53
Figura 4.14 – Estaciones meteorológicas disponibles, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	54
Figura 4.15 – Ejemplo de imágenes satelitales, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, plataforma EELFUX	57
Figura 5.1 – Conceptualización cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, modelo <i>WEAP</i>	59
Figura 5.2 – Distribución por usos de suelo, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.....	59
Figura 5.3 – Conceptualización cuenca río Perquilauquén en San Manuel, modelo <i>WEAP</i>	61
Figura 5.4 – Distribución por usos de suelo, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	62
Figura 6.1 – Evaporación por evaporímetros de bandeja, estaciones Parral y Liguay, a escala mensual.	64
Figura 6.2 – Evapotranspiración de referencia por evaporímetros de bandeja, estaciones Parral y Liguay, a escala mensual.....	64
Figura 6.3 – Evapotranspiración de referencia, ecuación de Penman y Monteith, a escala mensual.	65

Figura 6.4 – Evapotranspiración de Cultivo, ecuación de Penman y Monteith, a escala mensual. .	65
Figura 6.5 – Evapotranspiración por teledetección, plataforma EEFLUX, a escala mensual.	66
Figura 6.6 –Caudales simulados y observados, serie completa, a escala mensual.	66
Figura 6.7 – Caudales simulados y observados, serie mensual promedio.	67
Figura 6.8 – Correlación entre caudal observado y caudal simulado.....	67
Figura 6.9 – Evapotranspiración de referencia, modelación hidrológica, a escala mensual.....	68
Figura 6.10 – Evapotranspiración de cultivo, modelación hidrológica, a escala mensual.....	68
Figura 6.11 – Evapotranspiración, modelación hidrológica, a escala mensual.....	69
Figura 6.12 – Evaporación por evaporímetros de bandeja, estaciones Digua Embalse, Bullileo Embalse y Caracol, a escala mensual.....	69
Figura 6.13 – Evapotranspiración de referencia, estaciones Digua Embalse, Bullileo Embalse y Caracol, a escala mensual.....	69
Figura 6.14 – Evapotranspiración de referencia, ecuación de Penman y Monteith,	70
Figura 6.15 – Evapotranspiración de Cultivo, ecuación de Penman y Monteith, a escala mensual.	70
Figura 6.16 – Evapotranspiración por teledetección, plataforma EEFLUX, a escala mensual.	71
Figura 6.17 –Caudales simulados y observados, serie completa, a escala mensual.	71
Figura 6.18 – Caudales simulados y observados, serie mensual promedio.	72
Figura 6.19 – Correlación entre caudal observado y caudal simulado.....	72
Figura 7.1 – Balance hídrico anual, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala anual.	78
Figura 7.2 –Caudales simulados y observados, precipitación modificada, serie completa, a escala mensual.....	79
Figura 7.3 – Caudales simulados y observados, precipitación modificada, serie mensual promedio.	79
Figura 7.4 – Correlación entre Caudal Observado y caudal simulado.	80
Figura 7.6 – Comparación entre Evapotranspiración según la precipitación inicial y la precipitación modificada, modelación hidrológica, a escala mensual.....	82
Figura 7.7 – <i>Timelapse</i> cuenca río Perquilauquén en San Manuel. Imagen superior: uso de suelo año 1993, imagen inferior: uso de suelo año 2018.....	83
Figura 7.8 – Evapotranspiración de referencia según diferentes alternativas de estimación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual	84
Figura 7.9 – Evapotranspiración de referencia según diferentes alternativas de estimación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala mensual.	84
Figura 7.10 – Evapotranspiración de cultivo, coef. de cultivo arroz, según diferentes alternativas de estimación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual.....	85
Figura 7.11 – Evapotranspiración de cultivo, coef. de cultivo coníferas, según diferentes alternativas de estimación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala mensual.....	85
Figura 7.12 – Evapotranspiración, según diferentes alternativas de estimación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual.	86
Figura 7.13 – Evapotranspiración, según diferentes alternativas de estimación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala mensual.....	86

Figura 7.14 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” ecuación <i>Penman</i> y <i>Monteith</i> , cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	88
Figura 7.15 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” modelo <i>WEAP</i> , cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	89
Figura 7.16 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” ecuación <i>Penman</i> y <i>Monteith</i> , cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	89
Figura 7.17 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” modelo <i>WEAP</i> , cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	90
Figura 7.18 – Estacionalidad, Ecuación <i>Penman</i> y <i>Monteith</i> cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	91
Figura 7.19 – Estacionalidad, Ecuación <i>Penman</i> y <i>Monteith</i> cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	91
Figura 7.20 – Comparación entre de evapotranspiración de cultivo y evapotranspiración por teledetección, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual.	92
Figura 7.21 – Comparación entre de evapotranspiración de cultivo y evapotranspiración por teledetección, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala mensual.	93
Figura 7.22 – Correlación entre “ETc” evaporímetro estación Parral y “ET” plataforma <i>EEFLUX</i> , cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	94
Figura 7.23 – Correlación entre “ETc” evaporímetro Estación Digua embalse y “ET” plataforma <i>EEFLUX</i> , cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	94
Figura Apéndice 1.0 – Ilustración de acuíferos de la cuenca río Maule.	107

Lista de Tablas

Tabla 4.1 – Catastro de las estaciones meteorológicas de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.....	52
Tabla 4.2 – Variables climáticas disponibles por estación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.....	52
Tabla 4.3 –Catastro de las estaciones meteorológicas de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	53
Tabla 4.4 – Variables climáticas disponibles por estación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	54
Tabla 4.5 – Gradiente mensual promedio de precipitación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	55
Tabla 4.6 –Catastro de las estaciones fluviométricas de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.....	56
Tabla 4.7 –Catastro de las estaciones fluviométricas de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	56
Tabla 4.8 –Catastro de imágenes satelitales en la zona de estudio	56
Tabla 5.1 – Detalle de unidades hidrológicas por subcuencas, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.....	59
Tabla 5.2 – Clasificación de uso de suelo, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	60
Tabla 5.3 – Coeficientes de cultivo (K_c), cuenca estero Curipeumo en lo Hernández	60
Tabla 5.4 – Coeficientes de reflexión del cultivo (α), cuenca estero Curipeumo en lo Hernández ..	60
Tabla 5.5 – Fracción de Nubosidad, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.	60
Tabla 5.6 – Demandas de agua, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.....	60
Tabla 5.7 – Detalle de unidades hidrológicas por subcuencas, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	61
Tabla 5.8 – Clasificación de uso de suelo, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	62
Tabla 5.9 – Coeficientes de cultivo (K_c), cuenca río Perquilauquén en San Manuel.....	62
Tabla 5.10 – Coeficientes de reflexión del cultivo (α), cuenca río Perquilauquén en San Manuel ..	62
Tabla 5.11 – Fracción de Nubosidad, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	63
Tabla 5.12 – Demandas de agua, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	63
Tabla 6.1 – Coeficientes estanque evaporímetro (K_p), variación mensual.....	63
Tabla 6.2 – Indicadores de bondad de ajuste, serie completa.	66
Tabla 6.3 – Parámetros agronómicos\hidrológicos de modelación.	68
Tabla 6.4 – Indicadores de bondad de ajuste, serie completa.	71
Tabla 6.5 – Parámetros agronómicos\hidrológicos de modelación.	73
Tabla 7.1 – Variación porcentual entre caudales, modelación hidrológica inicial, río Perquilauquén en San Manuel.	76
Tabla 7.2 – Indicadores de bondad de ajuste, precipitación modificada, serie completa.	79

Tabla 7.3 – Parámetros agronómicos\hidrológicos de modelación, precipitación modificada.	80
Tabla 7.4 – Variación porcentual entre caudales, modelación hidrológica con precipitación modificada, río Perquilauquén en San Manuel.	81
Tabla Anexo 1.1 – Derechos de agua otorgados, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández. ...	106
Tabla Anexo 1.2 – Derechos de agua otorgados, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.	106

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El principal abastecedor natural disponible, quien establece la oferta de agua en el planeta, es la atmósfera terrestre, capa gaseosa responsable de uno de los fenómenos más relevantes, la precipitación. Ahora bien, en el modelo idealizado del movimiento de circulación del agua, la precipitación es el mecanismo de entrada para almacenamiento y distribución de agua en la superficie terrestre, ya sea de manera pluvial o nival. Sin embargo, este fenómeno natural presenta una ocurrencia aleatoria, a diferencias de procesos continuos, tales como, la evapotranspiración y la escorrentía, todos ellos relacionados con la disponibilidad del recurso hídrico.

Producto de la incertidumbre en la recurrencia y magnitud de un evento de precipitación o de la variabilidad en el volumen de agua disponible por parte de la escorrentía, la pérdida de agua por parte de las superficies del suelo y de la cobertura vegetal se considera como una variable continua que incide en los flujos de entrada y salida de un determinado volumen de control, a saber, una cuenca hidrográfica.

Por lo tanto, la evapotranspiración será una de las variables que influye directamente en la disponibilidad de agua en una cuenca [1], lo que implica que disponer de una estimación que sea lo más cercano posible al poder evaporante de la atmósfera, en conjunto con la transpiración generada por una cobertura vegetal, favorece al aprovechamiento óptimo de agua, tanto para el dimensionamiento de obras hidráulicas como para el abastecimiento del consumo humano o agrícola.

Ahora bien, las alternativas que se disponen para lograr registrar o estimar magnitudes de evapotranspiración [2] son limitadas y varían según su alcance de captura, costo e incertidumbre, como, por ejemplo, para registros precisos de evapotranspiración, se utiliza el sistema de covarianza de flujos turbulentos (*Eddy Covariance*), las torres de flujo (*Eddy Flux Tower*) o lisímetros, pero su capacidad de captura no tiene variabilidad espacial, es decir, su alcance es local para predios de cultivo, además requieren recurrente mantención y altos costos de inversión.

Por el contrario, la evapotranspiración estimada mediante la observación de estaciones meteorológicas o la ecuación de FAO *Penman-Monteith* [3] con los valores del estado de desarrollo del cultivo, entregan registros con variabilidad espacial y sus magnitudes han demostrado tener semejanza con las mediciones instrumentales. Además, se disponen de registros históricos de acceso liberado para mediciones tanto de variables meteorológicas como fluviométricas y de valores tabulados por cultivo y fase de desarrollo. Sin embargo, estaciones de monitoreo suspendidas, descalibradas o insuficientes, registros de observaciones hidrometeorológicas incompletas, inadecuadas o limitadas y cuencas no controladas, son algunos de los inconvenientes que surgen para lograr estimar la evapotranspiración, lo que implica la necesidad de buscar alternativas que subsanen la problemática de disponibilidad e incertidumbre.

Como iniciativa, se propone evaluar la evapotranspiración real registrada por imágenes satelitales o teledetección y disponible en plataformas de acceso liberado, con registros que alcanzan periodos superiores de 20 años. Cabe destacar que los registros disponibles por parte de las imágenes satelitales para su distribución en el espacio son de evapotranspiración potencial y real.

Se escoge como plataforma informática de captura a *Google Earth Engine* ¹, plataforma geomática basada en la nube, lo que significa que permite almacenar o acceder a datos y códigos geomáticos a través de internet con acceso liberado. Su aplicación va desde estudios de teledetección remota hasta predecir y gestionar recursos naturales. Dispone de una colección de imágenes de diferentes sensores (satélites) que datan de los años 80, lo que implica una variada resolución espacial con diferentes herramientas de modelación [4]. Una de ellas es la herramienta *EEFLUX (Earth Engine Evapotranspiration Flux)* ², modelo de balance energético de superficie que estima la radiación neta, el flujo de calor sensible al aire y el flujo de calor conductivo al suelo y permitiendo obtener la evapotranspiración, residual del balance por energía térmica [5]. Por consiguiente, para realizar una comparación cuantitativa de la captura de la evapotranspiración real por teledetección y evaluar su aplicación en la modelación hidrológica, se considera comparar su magnitud con los resultados obtenidos mediante tres metodologías distintas, a saber, la evapotranspiración de cultivo por instrumental de monitoreo, por expresión empírica validada por la FAO de *Penman-Monteith* y por la modelación hidrológica. Dicha comparación se realizará en dos cuencas hidrográficas de una misma región del país, pero con la particularidad de presentar diferente uso de suelo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación de la evapotranspiración mediante imágenes satelitales, en comparación con la evapotranspiración obtenida por instrumental de monitoreo, expresión empírica de *Penman-Monteith* y modelación hidrológica de cuencas.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que conlleva este trabajo serían los siguientes:

- Analizar el modelo EEFLUX y registrar la evapotranspiración real para dos subcuencas hidrográficas con coberturas de cultivo abundante y escaso, dentro de un periodo de registro superior a 20 años.
- Estimar la evapotranspiración de cultivo según la información del proceso de evaporación disponible por evaporímetros como instrumental de monitoreo y por la expresión empírica de *Penman* y *Monteith*.
- Generar una modelación hidrológica, bajo un modelo determinístico distribuido de flujo no permanente, en cuencas hidrográficas con diferentes usos de suelo e identificar su evapotranspiración disponible.
- Comparar y evaluar la evapotranspiración real producto de imágenes satelitales con la evapotranspiración de cultivo obtenida por instrumental de monitoreo, expresión empírica y por modelación hidrológica de cuencas.

¹ *Google Earth Engine*

<https://earthengine.google.com/>

² *EEFLUX, Earth Engine Evapotranspiration Flux*

<https://eeflux-level1.appspot.com/>

1.3. Organización del documento

A continuación, se describen brevemente los capítulos que constituyen este informe.

En el capítulo N.º 2 *Marco Teórico*, es la exposición en conjunto de investigaciones, teorías y conceptos en que se basa esta investigación. Contiene los antecedentes, las bases teóricas y los conceptos claves para el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo N.º 3 *Metodología*, es la descripción de los procesos y procedimientos involucrados en la realización de la evaluación de la evapotranspiración por teledetección, y como su vínculo permite cumplir con los objetivos de este trabajo de título.

En el capítulo N.º 4 *Caracterización de la zona de estudio*, demostración de la zona de estudio, a saber, la descripción climática, hidrológica, topográfica, de uso de suelo y de disponibilidad de información hidrometeorológica, perteneciente a cada cuenca hidrográfica.

En el capítulo N.º 5 *Modelación hidrológica*, se representa matemáticamente del comportamiento de los procesos que integran el ciclo hidrológico dentro de una cuenca o área de drenaje, siendo las pérdidas del recurso hídrico, el proceso a evaluar.

En el capítulo N.º 6 *Resultados*, se expondrá y describirá la información obtenidas para una posterior interpretación de las alternativas disponibles para estimar las tasas de evapotranspiración.

En el capítulo N.º 7 *Análisis de resultados*, interpretación y estudio de la información resultante obtenida en el desarrollo del trabajo de título.

En el capítulo N.º 8 *Conclusiones y comentarios*, Síntesis y proposición final que argumenta, explica y valida el análisis realizado a la evapotranspiración proveniente de la teledetección, disponible por la plataforma *EEFLUX*.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Proceso de evapotranspiración

Se denomina evapotranspiración a la combinación de procesos de transferencia de agua que ocurren desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Estos procesos que interactúan en conjunto corresponden a la evaporación de la superficie de suelo y a la transpiración de los tejidos de los cultivos.

2.1.1. Evaporación

Proceso de transferencia mediante el cual el agua sufre un cambio de estado, desde una condición líquida a otra de naturaleza gaseosa, la cual asciende hacia la atmósfera. El proceso de evaporación inicia con la absorción de la energía necesaria para realizar el cambio de fase que sufren las moléculas de agua, el denominado calor latente de vaporización [6]. Esta energía proveniente de la radiación solar que incide en la superficie terrestre provoca un aumento de la temperatura en suelos, cuerpos de agua y el aire que los rodea. Por lo tanto, la reacción frente a este estímulo será transformar en energía cinética el calor de vaporización al producir un cambio en la estructura molecular de cada partícula de agua, contribuyendo al enfriamiento de la superficie terrestre [7]. Así la evaporación, será el mecanismo por el cual cada superficie podrá compensar el balance radiativo y contribuir al ciclo hidrológico, evitando su sobrecalentamiento por la acumulación de radiación y entregar a la atmósfera partículas de vapor de agua para almacenar en forma de humedad.

La evaporación es un proceso dinámico, lo que implica que su tasa de evaporación o cantidad de partículas de agua que sufren un cambio de fase y se transfieren hacia la atmósfera es variable, por esa razón los factores que condicionan este proceso son los siguientes [1]:

- Poder Evaporante de la Atmósfera
- Superficie Evaporante
- Disponibilidad de agua

2.1.1.1. Poder evaporante de la atmósfera

Para cuantificar el proceso de evaporación de manera independiente a la disponibilidad de agua o a las condiciones de la superficie evaporante, se dispone el concepto del poder evaporante de la atmósfera, es decir, la capacidad de evaporar desde un cuerpo de agua por factores meteorológicos [8]. Para que exista evaporación dentro de la interacción del aire con un cuerpo de agua debe existir un gradiente de presiones de vapor entre la presión de vapor del aire con su presión de saturación, el cual se denomina déficit higrométrico:

$$\vartheta = e_s - e_a$$

ϑ : Déficit Higrométrico

e_s : Presión de vapor saturado

e_a : Presión de vapor del aire

Por lo tanto, según la ley de *Dalton*, la tasa de evaporación para una superficie de agua será la siguiente:

$$E = K * \vartheta$$

E = Tasa de Evaporación
K: Factor meteorológico
\vartheta: Déficit Higrométrico

Según *Dalton*, el producto entre el déficit higrométrico y un factor dependiente de las condiciones meteorológicas expresaría la tasa de evaporación que sufre un cuerpo de agua por la acción atmosférica. Cabe destacar que, el factor “K”, depende de variables meteorológicas tales como la velocidad de viento, la estabilidad atmosférica, el suministro de energía o la radiación solar que provoca el cambio de estado del agua [8]. Por lo tanto, el poder evaporante de la atmósfera dependerá exclusivamente de las condiciones meteorológicas, tales como la presión de vapor del aire, presión de vapor saturada, temperatura del aire y velocidad del viento que interactúan en un cuerpo de agua próximo a evaporar.

2.1.1.2. Superficie evaporante

Se denomina superficie evaporante, a toda superficie con presencia o disponibilidad de partículas de agua que se encuentre expuesta a radiación térmica (radiación solar) y alcance la cantidad de energía necesaria para cambiar de fase o calor latente de vaporización [9]. Las partículas de agua estarán disponibles dentro de una superficie evaporante tanto en estado líquido como aguas continentales u oceánicas y en estado sólido como masas de hielo.

Las características que influyen en el proceso de evaporación, será inicialmente la cantidad disponible evaporable, la cual dependerá del tamaño de la superficie, su estado de reposo o movimiento y la presencia o no de cobertura vegetal, ya que un cuerpo de agua extenso en movimiento y sin la presencia de alguna cobertura, como es el caso del oleaje en el océano, tendrá una mayor tasa de evaporación que superficies de suelo con cobertura vegetal o que suelos desnudos [10].

2.1.1.3. Disponibilidad del agua

La disponibilidad de agua es el factor que gobierna el proceso de evaporación, porque al ser un proceso que pertenece al ciclo hidrológico, será dinámico y permitirá mantener controlada la temperatura de la superficie terrestre con la acumulación de humedad en la atmósfera. Por lo tanto, se deberá disponer de alguna reserva para satisfacer el poder evaporante de la atmósfera [1] y continuar con la circulación de agua dentro de toda posible superficie evaporante de la tierra.

2.1.2. Transpiración

Proceso de transferencia mediante el cual las partículas de agua disponibles dentro de los espacios intercelulares de los tejidos de las plantas o cultivos ascienden en estado gaseoso hacia la atmósfera [11]. El flujo de agua que comprende el proceso de transpiración comienza de la extracción del agua por medio de las raíces del cultivo desde un estrato de suelo con agua disponible que se encuentra dentro de los límites de su capacidad de campo y su punto de marchitez permanente, para que posteriormente por capilaridad se dirijan hacia los estomas o abertura de la hoja de la planta o cultivo y permitan su emisión de gases o vapor de agua en dirección hacia la atmósfera [12].

Por lo tanto, el intercambio gaseoso con la atmósfera dependerá de la abertura estomática [3] que posee la hoja en donde se acumulará humedad y se realiza la vaporización. Los factores que influyen en el proceso de la transpiración serán los siguientes:

- Condiciones hidrometeorológicas
- Características de cultivo

2.1.2.1. Condiciones hidrometeorológicas

La transpiración dependerá de la vaporización de las partículas de agua que almacene dentro de sus hojas, por lo que se requiere el estímulo energético para llevar a cabo el cambio de estado a vapor. Por esta razón, las condiciones hidrometeorológicas preponderantes dentro de la extensión de cultivo, tales como radiación solar, gradiente de presión de vapor, velocidad del viento, temperatura del aire, los eventos de precipitación y la humedad del aire determinarán la tasa de transpiración del cultivo [8], así como la necesidad de riego.

2.1.2.2. Características de cultivo

La tasa de transpiración está directamente ligada con la especie, tipo de suelo y prácticas de cultivo, porque esta tasa no es constante, varía por las características del cultivo, a saber, su especie o tipo planta, la disponibilidad de agua que permita almacenar el tipo de suelo en donde se encuentre plantada y según el estado de desarrollo que alcance la planta, ya que para cada etapa de desarrollo que presente el cultivo, tendrá una diferente tasa de transpiración [3].

2.1.3. Evapotranspiración

La pérdida de agua que sufre una superficie terrestre con presencia de cobertura vegetal por la acción del poder evaporante de la atmósfera, sus condiciones hidrometeorológicas y sus características de cultivo, se denomina evapotranspiración, es decir la combinación de los procesos de evaporación y transpiración [7]. Sin embargo, ambos procesos ocurren simultáneamente, por lo que existe la dificultad distinguirlos individualmente, como es el caso de las mediciones de transpiración, ya que en vez de discernir entre lo que evapora y transpira el cultivo se prefiere considerar la medición de la evapotranspiración que genera la extensión de cobertura vegetal bajo variables climáticas y de cultivo.

Por esta razón, es necesario unificar la comprensión de las variaciones de evapotranspiración, bajo la diversidad de condiciones de clima, suelos y vegetación. Las variaciones de evapotranspiración posibles son las siguientes [13]:

- Evapotranspiración de Referencia
- Evapotranspiración del Cultivo
- Evapotranspiración Real
- *Actual Evapotranspiration*

2.1.3.1. Evapotranspiración de referencia

Corresponde a la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricción de agua. Ahora bien, se denomina superficie de referencia a una superficie vegetal continua, válida para cualquier región del mundo y por lo cual se le atribuye una cobertura vegetal baja, tipo pasto. Además, la ausencia de restricciones hídricas significa que la disponibilidad de agua en el suelo es ilimitada, es decir que se encuentra en capacidad de campo, termino referido al contenido de agua o humedad retenida por el suelo posterior a su estado de saturación [14]. Por lo tanto, la evapotranspiración de referencia dependerá exclusivamente de las condiciones climáticas imperantes en cada lugar [3]. Su denominación proviene de la traducción *Reference Crop Evapotranspiration* según FAO 56³ y abreviada como "ET_o". Para este trabajo de título, se utilizará la expresión de evapotranspiración de referencia y la abreviación de ET_o.

2.1.3.2. Evapotranspiración de cultivo

Corresponde a la tasa de evaporación que producirá cualquier cultivo, exento de enfermedades, con buena fertilización, con etapas de desarrollo en parcelas amplias y bajo condiciones óptimas de suelo y agua, alcanzando la máxima producción dependiendo de las condiciones climáticas reinantes [3]. Esto representa la evapotranspiración para cualquier especie o en cualquier estado de desarrollo, bajo las condiciones meteorológicas imperantes del lugar de plantación.

Por lo tanto, la evapotranspiración de cultivo será interpretada a partir de la información hidrometeorológica disponible y los atributos propios de cada cultivo, lo que significa que representa el producto de la evapotranspiración de referencia "ET_o" con un factor que dimensione las características de la plantación, el cual se denomina coeficiente de cultivo, abreviado con la sigla "K_c". Este coeficiente se ha determinado experimentalmente y se encuentra tabulado dependiendo del tipo y la etapa de desarrollo en que se encuentre el cultivo.

Por consiguiente, la evapotranspiración de cultivo tiene abreviación de "ET_c" y se expresa de la siguiente manera:

$$ET_c = K_c * ET_o$$

ET_c: Evapotranspiración de cultivo

K_c: Coeficiente de cultivo

ET_o: Evapotranspiración de referencia

Cabe destacar que, su nombre específico es evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ya que representa la intensidad máxima de evapotranspiración sobre una superficie continua y homogénea de cultivos en crecimiento activo bajo condiciones de disponibilidad ilimitada de agua en el suelo, ya que deriva de la traducción *Potential Evapotranspiration* [15], pero para efectos de este trabajo de título será nombrada simplemente como evapotranspiración de cultivo con las siglas "ET_c". Cabe destacar que, producto de los objetivos de este estudio se será omitida la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar, porque se requiere de información más precisa de las condiciones del terreno, a saber, plagas y enfermedades, salinidad del suelo o el grado de fertilidad del suelo [3].

³ *Crop evapotranspiration - FAO Irrigation and drainage paper 56*
<http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>

2.1.3.3. Evapotranspiración real

Corresponde a la tasa de evapotranspiración de una superficie con un determinado estado de desarrollo del cultivo y con cualquier contenido de agua en el suelo [16]. Esto representa la transferencia real de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, debido a los procesos del balance hidrológico, a saber, la evaporación y la transpiración. Bajo determinadas condiciones meteorológicas, de cultivo y de disponibilidad de agua que posea el suelo y el propio cultivo. Comúnmente se denota a la evapotranspiración real como simplemente evapotranspiración y se abrevian como “ETr” o “ET”.

2.1.3.4. Actual Evapotranspiration

Corresponde a la tasa de evapotranspiración que se obtiene como residuo del balance energético de la superficie terrestre, es decir, la cantidad de flujo de calor latente que se desprende del equilibrio entre la radiación solar incidente, el flujo de calor sensible y el flujo de calor del suelo [17]. La expresión “*Actual Evapotranspiration*”⁴, abreviada como “ETa”, se traduce al español como “Evapotranspiración real” debido a que expresa la cantidad de agua que realmente se elimina de una superficie. Por lo tanto, la evapotranspiración real o la pérdida de disponibilidad de agua que posee el balance hidrológico y la “*Actual Evapotranspiration*” o el valor residual del balance energético superficial, representan la misma pérdida de agua que sufre una superficie debido a los procesos de evaporación y transpiración [13], pero con diferentes metodologías de balance.

Para los efectos de comprensión en este trabajo de título la denominación Evapotranspiración con las siglas “ET”, mencionada anteriormente, corresponderá no solo para denominar a la evapotranspiración real, sino también a la evapotranspiración actual.

2.2. Enfoque Hidrológico

El enfoque hidrológico corresponde a la aplicación del método de balance hídrico, el cual permite la estimación de la pérdida de disponibilidad del recurso hídrico por medio de la cuantificación del ciclo hidrológico [7].

El ciclo hidrológico es un modelo que representa el movimiento de la circulación del agua, en donde establece la participación de los procesos que posibilitan de transferencia hídrica desde y hacia la superficie terrestre, tales como la precipitación, escorrentía o la evapotranspiración, entre otros. Ahora bien, la cuantificación de los procesos de transferencia de agua se realiza por medio del concepto de la conservación de la masa, representada por la siguiente expresión [6]:

$$I(t) - Q(t) = \frac{\partial V}{\partial t}$$

I(t): Variable de Entrada en función del tiempo

Q(t): Variable de Salida en función del tiempo

$\partial V / \partial t$: Tasa de cambio de almacenamiento en función del tiempo

Expresión que representa la variación del almacenamiento que posee un cierto volumen de control producto de las variables de entrada y salida que sufre en el tiempo.

⁴ *Physical Geography, Glossary of Terms*

http://www.physicalgeography.net/physgeoglos/a.html#actual_evaporation

Ahora bien, si se establece que el volumen de control será la superficie terrestre, la expresión podrá ser aplicada a nivel de cuencas hidrográficas, adquiriendo la denominación de ecuación general de balance hidrológico. Una forma explícita de representar la ecuación general de balance hidrológico es identificando las variables que constituyen su equilibrio dentro de un intervalo de tiempo [18]:

$$P \pm Q_{sup} \pm Q_{sub} - E - T = \partial V_{sup} + \partial V_{sub} + \partial V_{niv}$$

P: Precipitación

Q_{sup}: Caudal por aguas superficial de entrada y salida.

Q_{sub}: Caudal por aguas subterráneas de entrada y extracción.

E: Evaporación

T: Transpiración

∂V_{sup}: Variación del volumen de agua superficial

∂V_{sub}: Variación del volumen de agua subterráneas

∂V_{niv}: Variación del volumen nival

Si se realiza un análisis de escorrentía superficial para periodos de tiempo superiores a 20 años, dentro de la ecuación general de balance hidrológico se podrán omitir algunas variables [1], dando como resultado una versión simplificada:

$$P - ET = Q$$

P: Precipitación

ET: Evapotranspiración

Q_{sup}: Caudal de Escorrentia Superficial

Esta expresión simplificada considera únicamente las pérdidas asociadas a los procesos de evaporación y transpiración, englobado en la variable denominada “Evapotranspiración”. Además, siendo la precipitación el único ingreso de la cuenca hidrográfica, la variabilidad del volumen de agua disponible será reflejado por la componente del caudal de escorrentía. Es decir que, siendo la escorrentía el antecedente que presenta una menor incertidumbre en su medición [19], y considerando los registros pluviométricos con la mayor continuidad posible, la versión simplificada de la ecuación general de balance hidrológico permitirá la estimación de la disponibilidad de agua de la cuenca hidrográfica.

De manera adicional, se recalca que la denominada “Evapotranspiración” obtenida de la expresión simplificada como la pérdida de agua disponible, representa la misma variable residual que se obtiene del balance energético o como se mencionó anteriormente, a la denominación de evapotranspiración real.

2.3. Enfoque Energético

El enfoque energético corresponde a la aplicación del método del balance de energía superficial para representar el intercambio térmico entre la superficie terrestre y la atmósfera, con la finalidad de mantener en equilibrio la circulación del flujo de energía, es decir, la energía que llega a la superficie terrestre deber ser igual a la energía que sale en el mismo periodo de tiempo, por esa razón se debe cumplir el concepto de la conservación de la energía. Por lo tanto, la expresión que representa este balance en la superficie terrestre es la siguiente [10]:

$$Rn - G - \lambda ET - H = 0$$

Rn: Radiación Neta
G: Flujo de calor del suelo
H: Flujo de calor sensible
 λET : Flujo de calor latente

Las variables que conforman la expresión se idealizan como flujos verticales, despreciando los flujos horizontales que se transfieren por advección. Para que la sumatoria de flujos energético sea nula, el ingreso de la radiación neta proporcionará energía a la superficie terrestre, teniendo está que emitir o liberar energía por medio del aire, del suelo y de la interacción con la atmósfera, siendo está última la responsable de evitar el sobrecalentamiento de la superficie por absorción de calor latente, teniendo que utilizar la energía acumulada en el cambio de estado de las partículas de agua disponibles.

Por esta razón, el flujo de calor latente representa al proceso de evapotranspiración [3]. Sin embargo, para lograr determinar la evapotranspiración por medio del flujo de calor latente (λET) al ser considerado como el residuo de la ecuación de balance energético de la superficie, se deben disponer de factores adicionales como la temperatura del aire y la humedad relativa, los cuales permiten estimar la relación que existe entre el flujo de calor latente y el sensible, ósea la razón de Bowen [7]:

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET}$$

β : Razón de Bowen
H: Flujo de calor sensible
 λET : Flujo de calor latente

La razón de Bowen permite determinar el flujo de calor latente solo con la información meteorológica, de la temperatura del aire y su humedad relativa.

$$\beta = \gamma * \Delta t * \Delta e$$

β : Razon de Bowen
 Δt : Diferencia de temperatura del aire entre dos niveles de elevación
 Δe : Diferencia de presión de vapor entre dos niveles de elevación
 γ : Constante psicrométrica

Lo que permite reescribir la expresión de balance energético, despejando la variable del flujo de calor latente o la evapotranspiración [20]:

$$\lambda ET = \frac{Rn - G}{1 + \beta} = ET$$

λET : Flujo de calor latente
Rn: Radiacion Neta
G: Flujo de calor del suelo
 β : Razon de Bowen
ET: Evapotranspiración

Por lo tanto, el mecanismo de disipación de energía térmica proveniente de la circulación energética será el proceso de evapotranspiración, el cual contribuye al enfriamiento de la superficie terrestre y al modelo del ciclo hidrológico. De manera adicional, se destaca que la denominada “Evapotranspiración” obtenida de la expresión del balance energético como el flujo de calor latente, representa el mismo concepto asociado a la pérdida de disponibilidad de agua que aplica el balance hidrológico o como se mencionó anteriormente, a la denominación de evapotranspiración real.

2.4. Estimación de la evapotranspiración

Cuantificar la magnitud de procesos simultáneos y dinámicos, tales como la evaporación y la transpiración, genera un grado de incertidumbre en la precisión de la medición de evapotranspiración [21]. Por esta razón, existen diferentes alternativas para lograr registrar la medida del fenómeno o de lo contrario estimar su magnitud.

Las alternativas disponibles van desde instrumentales que detectan de manera in situ el valor de la evapotranspiración [2], a dispositivos de monitoreo que registran uno de los procesos que la componen como es el caso de la evaporación, hasta estaciones de recolección de información meteorológica utilizados para la estimación por expresiones empíricas [22].

Por lo general, la clasificación que reciben las alternativas de medición para la evapotranspiración es de procedimientos directos, teóricos y empíricos [23]. Para mediciones con instrumentales con un alto grado de precisión su clasificación será de procedimientos directos, para dispositivos de monitoreo para la evaporación será de procedimientos teóricos y el uso de expresiones empíricas en conjunto de la información meteorológica registrada se categoriza como procedimientos empíricos [24]. Ahora bien, existe otra propuesta que permite suministrar no solo variables meteorológicas o índices de vegetación, ya que, por medio de modelos de balance energético en la superficie, se logra entregar la magnitud de la evapotranspiración. Por esta razón, la evaluación de la aplicación de la percepción remota con el uso de imágenes satelitales para la estimación de la evapotranspiración a nivel de cuencas hidrográficas permitiría contribuir en escenarios en los cuales la información meteorológica es escasa, discontinua o de baja calidad [25].

El análisis de las alternativas disponibles para medir o estimar la evapotranspiración serán categorizada de la siguiente manera:

- Instrumental de Monitoreo
- Expresión Empírica
- Imágenes Satelitales

2.4.1. Instrumental de monitoreo

Corresponde al conjunto de instrumentales o dispositivos disponibles para la medición in situ de la evapotranspiración o de la evaporación registrada en la superficie terrestre [10]. Cada instrumento y dispositivo dependiendo de su función de medición presenta atributos y limitaciones, los cuales serán analizados a continuación.

Los instrumentos que cumplen la función de cuantificar la evapotranspiración [2] serán los siguientes:

- Sistema de Covarianza de Flujos Turbulentos (*Eddy Covariance*)
- Torres de Flujo (*Eddy Flux Tower*)
- Lisímetros

2.4.1.1 . Sistema de covarianza de flujos turbulentos (*Eddy Covariance*)

Instrumento de medición de fluctuaciones mediante anemómetros sónicos con analizador de gases, los cuales miden el flujo de partículas receptoras y emitidas dentro de la superficie evaporante, captando movimientos turbulentos de masas de gases “*Eddies*” de dióxido de carbono o valor de agua [26]. Entrega el registro preciso de la evapotranspiración de una superficie de cultivo producto del balance de energía superficial. Su limitación principal es variabilidad espacial, ya que realiza la medición de manera puntual la evapotranspiración (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Sistema de covarianza de flujos turbulentos. [2]

2.4.1.2. Torres de flujo (*Eddy Flux Tower*)

Instrumento que permite la observación del ciclo del carbono a nivel de ecosistema, expresando el intercambio de flujos de dióxido de carbono, moléculas de agua y calor sensible [27] por incluir a la técnica de flujos turbulentos (*Eddy Covariance*) con altura superiores de medición, las cuales entrega un registro continuo de los flujos de carbono a corto y largo plazo. Además, ofrece lecturas complementarias de variables como temperatura, radiación o flujo de calor del suelo, que de acuerdo con el balance energético superficial brinda la medición de la evapotranspiración. Su limitación es la implementación del instrumento en el área de estudio por su requerimiento de altura en la medición, pero brinda una gran variabilidad espacial y precisión en su medición (Figura 2.2).

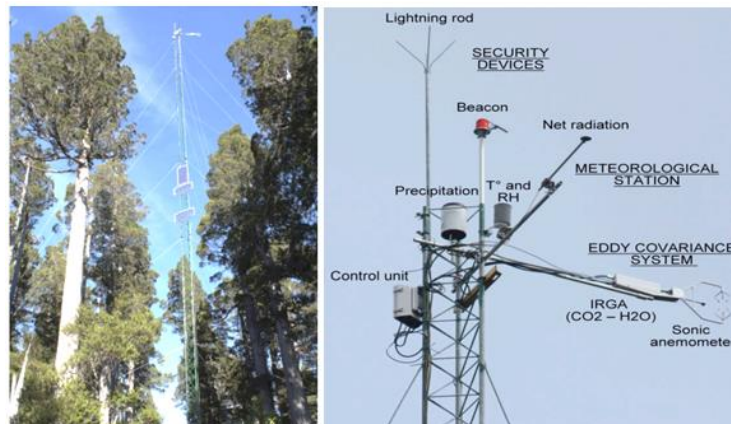


Figura 2.2 – Torres de flujo, conjunto de dispositivos de medición. [28]

2.4.1.3. Lisímetros

Instrumento que permite registrar la evapotranspiración de cultivo que desarrolla una superficie evaporante [10]. Consiste en un tanque asilado que contiene muestras de suelo y de cultivo, referente al área de estudio (Figura 2.3). En estos, se lleva a cabo un balance hídrico considerando las pérdidas asociadas al cultivo y la humedad retenida del suelo. Su limitación esta asociada a su implementación y tiempo requerido para realizar la medición. Sin embargo, ofrece valores precisos de evapotranspiración de cultivo con exactitud de centésimas de milímetro [3].



Figura 2.3 – Estación de monitoreo meteorológico con lisímetro.⁵

Por otra parte, el principal instrumento que cumplen la función de estimar la evaporación es el evaporímetro, el cual se dispone en diferentes formatos:

- Evaporímetro de Estanque o de Bandeja
- Atmómetro

2.4.1.4. Evaporímetro de estanque o bandeja

Instrumento que corresponde a un estanque de sección circular o rectangular que almacena un cierto volumen de agua en su interior, su disposición dependerá de nivel del cuerpo de agua o la cobertura vegetal que presente el área de estudio [3]. (Figura 2.4) La medición se realiza por medio de la variación del volumen almacenado, entregando la altura de agua pérdida desde sus condiciones iniciales, dando como resultado la evaporación del tanque evaporímetro. La función de este instrumento es cuantificar la evapotranspiración de referencia que presenta la superficie evaporante [29]:

$$ET_o = K_p * E_{pan}$$

ET_o: Evapotranspiración de referencia

K_p: Coeficiente del tanque evaporímetro

E_{pan}: Evaporación del tanque evaporímetro

La expresión anterior es el producto de la evaporación registrada por la variación del volumen de agua del evaporímetro con el factor que representa las condiciones ambientales y las del propio instrumental o coeficiente del estanque evaporímetro, que permitirá estimar de manera empírica la ET_o. Su limitación es la precisión de la evapotranspiración de referencia que dispone, ya que, al cuantificarla por medio de una expresión empírica, está se encuentra sujeta a incertidumbre [30].

⁵ Agricultureros, Lisímetro.

<https://agricultureros.com/lisimetros-instrumentos-para-conocer-el-balance-hidrico-del-suelo/>



Figura 2.4 – Evaporímetro de estanque circular. [31]

2.4.1.5. Atmómetro

Instrumento que registra la variación de agua producto de la evaporación desde un depósito a la atmósfera, a través de una superficie porosa de cerámica denominada como "*Bellani Cup*", la cual dispone de un tejido verde que simula el cultivo de referencia del que se quiera medir la evapotranspiración. Además, posee un depósito para el agua destilada de forma cilíndrica de policloruro de vinilo que incluye un tubo de cristal graduado que permite la lectura del nivel del agua [32]. Su limitación radica en las condiciones necesarias para mediciones precisas, ya que requiere de la ausencia de viento con temperaturas moderadas o con presencia de viento y altas temperaturas.

2.4.2. Expresión empírica

Se denomina expresión empírica⁶ a la representación matemática del comportamiento de un fenómeno en base a la observación, medición y experiencia de sus hechos. Por ello, para lograr estimar la evapotranspiración se han elaborado expresiones matemáticas que representen el proceso, considerando solamente características climáticas e información meteorológica [10], los cuales derivan de modelos empíricos, semi-empíricos o analíticos [33].

Dentro del abanico de expresiones empíricas que cuantifican el proceso de evapotranspiración, se considera para este trabajo de título al modelo con mayor viabilidad para la estimación de la evapotranspiración, el modelo propuesto por *Penman-Monteith*. Este modelo fue validado tanto por la FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) como por la EWRI-ASCE (*Environmental & Water Resources Institute by American Society of Civil Engineers*), y determina la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia [34].

⁶ Significados, Empírico.
<https://www.significados.com/empirico/>

La ecuación empírica de *Penman-Monteith* expresa la relación entre las variables meteorológicas con el enfoque energético de una superficie con cobertura vegetal uniforme, la cual tiene la siguiente formulación:

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{\bar{T} + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)}$$

ET_o: Evapotranspiración del cultivo de referencia [mm * dia⁻¹]

G: Flujo de calor de suelo [Mj * dia⁻¹ * m⁻²]

R_n: Radiación neta [Mj * dia⁻¹ * m⁻²]

T̄: Temperatura media del aire a 2m de altura [°C]

u₂: Velocidad del viento a 2m de altura [m * s⁻¹]

e_a: Presión real de vapor [kPa]

e_s: Presión media vapor de saturación [kPa]

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa * °C⁻¹]

γ: Constante psicométrica [0,655 * 10⁻³ kPa * °C⁻¹]

Por consiguiente, el detalle de cada uno de los parámetros que componen la ecuación de Penman-Monteith serán agrupados y expresados según su variable meteorológica asociada o la altura de medición.

2.4.2.1. Parámetros asociados a la temperatura del aire

- Temperatura Media del Aire:

$$\bar{T} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

T̄: Temperatura media del aire [°C]

T_{max}: Temperatura máxima del aire [°C]

T_{min}: Temperatura mínima del aire [°C]

- Presión Media de Vapor de Saturación:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2}$$

$$e^\circ(T): 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right)$$

e_s: Presión media de vapor de Saturación [kPa]

e[°](T): Presión de saturación de vapor a temperatura del aire [kPa]

T: Temperatura del aire [°C]

T_{max}: Temperatura máxima del aire [°C]

T_{min}: Temperatura mínima del aire [°C]

exp (.): 2,7183 (Base del logaritmo natural elevado a la potencia (.))

- Presión Real de Vapor:

$$e_a = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T_{rocio}}{T_{rocio} + 237,3}\right); e_a(T_{rocio} *)$$

* Por datos faltantes de humedad $\rightarrow T_{rocio} = T_{min}$

$$e_a = \frac{\left[e^{\circ}(T_{min}) * \frac{HR_{max}}{100}\right] + \left[e^{\circ}(T_{max}) * \frac{HR_{min}}{100}\right]}{2}; e_a(HR_{max}; HR_{min})$$

$$e_a = e^{\circ}(T_{min}) * \frac{HR_{max}}{100}; e_a(HR_{max})$$

e_a : Presión real de vapor [kPa]

T_{rocio} : Temperatura del punto de rocío [°C]

T_{max} : Temperatura máxima del aire [°C]

T_{min} : Temperatura mínima del aire [°C]

HR_{max} : Humedad relativa máxima [%]

HR_{min} : Humedad relativa mínima [%]

- Flujo de Calor del Suelo para Periodos Mensuales:

$$G = G_{mes,i} = 0,07 * (\bar{T}_{mes,i+1} - \bar{T}_{mes,i-1})$$

G : Flujo de calor de suelo [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

$G_{mes,i}$: Flujo de calor de suelo en el mes i [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

$\bar{T}_{mes,i+1}$: Temperatura media del aire en el mes $i + 1$ [°C]

$\bar{T}_{mes,i-1}$: Temperatura media del aire en el mes $i - 1$ [°C]

- Pendiente de la Curva de Presión de Vapor:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right)\right]}{(T + 237,3)^2}$$

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [$kPa * ^{\circ}C^{-1}$]

T : Temperatura del aire [°C]

$\exp(\dots)$: 2,7183 (Base del logaritmo natural elevado a la potencia (...))

2.4.2.2. Parámetros asociados a la radiación

- Radiación Neta:

$$Rn = R_{ns} - R_{nl}$$

Rn : Radiación neta [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

R_{ns} : Radiación neta de onda corta [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

R_{nl} : Radiación neta de onda larga [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

- Radiación Neta de Onda Corta:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s$$

R_{ns} : Radiación neta de onda corta [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

α : Coeficiente de reflexión del cultivo o albedo

R_s : Radiación solar entrante [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

- Radiación Neta de Onda Larga:

$$R_{nl} = \sigma * \left[\frac{T_{max,k}^4 + T_{min,k}^4}{2} \right] * (0,34 + 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

R_{nl} : Radiación neta de onda larga [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

σ : Constante de Stefan – Boltzmann [$4,903 * 10^{-9} MJ * dia^{-1} * m^{-2} * K^{-4}$]

$T_{max,k}$: Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [$K = °C + 273,16$]

$T_{min,k}$: Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [$K = °C + 273,16$]

e_a : Presión real de vapor [kPa]

R_s : Radiación solar entrante [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

R_{so} : Radiación solar en día despejado [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

- Radiación Solar en Día Despejado:

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * Z) * R_a$$

R_{so} : Radiación solar en día despejado [$Mj * día^{-1} * m^{-2}$]

R_a : Radiación extraterreste [$Mj * día^{-1} * m^{-2}$]

Z : Elevación de la estación sobre el nivel del mar [m]

- Radiación Extraterreste para Periodos Diarios:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * d_r * [\omega_s * \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega]$$

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos \left(\frac{2 * \pi}{365} * J \right)$$

$$\delta = 0,409 * \sin \left(\frac{2 * \pi}{365} * J - 1,39 \right)$$

$$\varphi = - \left(\frac{\pi}{180} \right) * \varphi(DMS)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi * \tan \delta)$$

R_a : Radiación extraterreste [$Mj * día^{-1} * m^{-2}$]

G_{sc} : Constante solar [$0,082 MJ * min^{-1} * m^{-2}$]

d_r : Distancia relativa inversa Tierra – Sol

J : Número del día en el año

ω_s : Ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]

φ : Latitud [rad]

δ : Declinación solar [rad]

2.4.2.3. Parámetros asociados al viento

- Velocidad del Viento:

$$u_2 = u_z * \frac{4,87}{\ln(67,8 * Z - 5,42)}$$

u_2 : Velocidad del viento a 2m de altura [$m * s^{-1}$]

u_z : Velocidad del viento medida a Z m sobre la superficie [$m * s^{-1}$]

Z: Elevación de la estación sobre el nivel del mar [m]

2.4.3. Imágenes satelitales

Corresponde a la aplicación de la teledetección o percepción remota como instrumento de escaneo a tiempo real para estimar la evapotranspiración de cualquier superficie evaporante [35]. Este registro se realiza por medio de satélites de acceso liberado, que disponen de sensores o instrumentos de canales espectrales específicos con la función de observar cantidades geofísicas [36]. Su base de datos ofrece cobertura a nivel global con variadas resoluciones espaciales dependiendo del satélite de observación a diferencia de las mediciones puntuales espacialmente no uniformes que se detectan en la superficie terrestre por medio de instrumentos de monitores [17]. Con respecto al proceso de evapotranspiración, el uso de imágenes satelitales proporciona medidas relativamente frecuentes y espacialmente continuas de variables biofísicas para estimar la evapotranspiración a diferentes escalas espaciales. La estimación de la evapotranspiración por teledetección se realiza por medio de los satélites *Terra*, *Aqua* o *Landsat*, quienes por medio de capturas por percepción remota de variables como temperatura o radiación solar y por modelos numéricos basados en el método del balance energético superficial, ofrecen la cuantificación de la evapotranspiración [2]. Dentro de las alternativas, Landsat es el que permite una precisión superior de la estimación ya que presenta una resolución espacial de 30 metros y una temporal de captura cada 16 días gracias a sus sensores *OLI-ETM+*. Sensores que permiten la observación de la reflectancia solar y la emisión térmica de 8 bandas espectrales y que tienen como diferencia principal, su periodo de captura que va desde 1999 a la fecha en el caso del sensor *ETM+* y desde el 2013 para el sensor *OLI* [37]. Cabe destacar que, la preferencia del satélite Landsat radica en que su contraparte, los satélites *Terra* y *Aqua* con sensores *MODIS* (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) solo disponen de resoluciones espacial de 250 y 1000 metros respectivamente, lo que reduce la precisión de la estimación [38].

La metodología que utilizan los modelo o plataformas de teledetección que entregan mediciones de evapotranspiración es por medio del balance energético superficial, ya que disponen de la información satelital de la radiación solar reflejada (reflectancia solar) y la emisión térmica irradiada por parte de superficie, lo cual permite estimar el flujo de calor latente [38]. Para efectos de este trabajo de título se utilizará la plataforma de acceso liberado *EEFLUX* (*Earth Engine Evapotranspiration Flux*), la cual permite el procesamiento de la imagen satelital por medio de balance energético superficial utilizando el satélite *Landsat* y el sensor *ETM+*. Las limitaciones que tiene la aplicación de la teledetección es la variabilidad de la resolución que genera la nubosidad y el periodo entre capturas por parte de Landsat, porque dependiendo del porcentaje de nubes que posea la imagen satelital, será la estimación de evapotranspiración que se podrá tener en las áreas cubiertas por las nubes, ya que la nubosidad no permite la correcta reflectancia espectral [39] y porque la órbita del satélite se sitúa a 705 [km] de altitud, recorriendo un mismo lugar cada 16 días dependiendo de la latitud [36], lo que implica que aproximadamente se dispondrán de máximo dos imágenes al mes.

2.5. Modelación hidrológica

Se denomina modelación hidrológica a la representación matemática simplificada del funcionamiento y comportamiento de los procesos que componen el ciclo hidrológico delimitados al nivel de cuenca. Los procesos más relevantes que componen la modelación y que permiten la simulación de escorrentía superficial que aporta una cuenca hidrográfica son la precipitación, evapotranspiración y/o infiltración [40]. Para el desarrollo de este trabajo de título, se escogió el modelo desarrollado por el *Stockholm Environment Institute* y denominado como *WEAP*⁷ o *Water Evaluation and Planning System*. Modelo que permite planificar el recurso hídrico al simular y gestionar sistemas hidrológicos a nivel de cuencas integrando el principio básico del balance hídrico. Debido a que se desea realizar una modelación con periodos de tiempo superiores a 20 años, se escoge el modelo *WEAP*, porque éste permite trabajar con escalas de tiempo de días, semanas o meses entre periodos que van desde un año hasta más de cien años de estudio [41].

2.5.1. Modelo WEAP

El modelo *WEAP* corresponde a una plataforma computacional con interfaz gráfica SIG que esquematiza la modelación hidrológica permitiendo incorporarle variables tales como precipitación, escorrentía e infiltración, evapotranspiración, los requerimientos del cultivo y rendimientos, interacción agua superficial/agua subterránea y la calidad del agua dentro de la simulación. Su aplicación radica en la planificación del recurso hídrico balanceando la oferta generada por variables climáticas a escala de subcuencas con la demanda de agua proyectando variabilidad espacial y temporal dentro del modelo. Se describe como un modelo hidrológico espacialmente continuo configurado a nivel de subcuencas, que es cuasi físico unidimensional por representar a la cuenca de estudio como un sistema de dos receptáculos de suelo en donde se desarrollan balances hídricos en diferentes tipos de coberturas o usos de suelo [42]. Dispone de diferentes metodologías para desarrollar la simulación hidrológica de la cuenca hidrográfica, las cuales son las siguientes [43]:

1. Método del Coeficiente Simplificado (Solo Demandas de riego): Método más simple, utiliza los coeficientes de los cultivos para calcular la evapotranspiración o demanda de riego de los cultivos en la cuenca. No simula procesos de escorrentía, infiltración o cambios en la humedad de suelo.
2. Método del Coeficiente Simplificado (Precipitación - Escorrentía): Método que utiliza los coeficientes de cultivo para la simulación de la precipitación como escorrentía hacia una unidad de río y/o agua subterránea.
3. Método de Humedad del Suelo (Precipitación – Escorrentía): Método que representa la cuenca con dos capas de suelo, además del potencial para la acumulación de nieve. En la capa superior simula la evapotranspiración, la escorrentía, el interflujo poco profundo y cambios en la humedad del suelo. En la capa inferior del suelo se simula el enrutamiento del caudal base al río y cambio en la humedad de suelo.
4. Método MABIA: Método que representa la simulación diaria de la transpiración, la evaporación, las necesidades de riego, el crecimiento y rendimiento del cultivo.
5. Método Crecimiento de Cultivos: Método que simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua y el rendimiento a nivel diario.

⁷ *WEAP, Water Evaluation and Planning*
<https://www.weap21.org>

Cabe destacar que, para este trabajo de título se adoptó la metodología de la humedad del suelo, porque permite caracterizar el uso de suelo de la cuenca y/o la influencia sobre la escorrentía simulada por la precipitación [41], característica necesaria para la evaluación de cuencas hidrográficas con diferentes usos de suelo.

2.5.2. Método de humedad del suelo

Método integrado del modelo *WEAP* que permite la conceptualización de los impactos del uso de suelo y el tipo de suelo en los procesos hidrológicos⁸. Por lo cual, el esquema unidimensional de este método corresponde a dos unidades de almacenamiento o estanques que representan a la cuenca utilizando funciones empíricas para describir procesos hidrológicos como la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la escorrentía subsuperficial y la percolación profunda [41], tal como se muestra en la siguiente figura [42]:

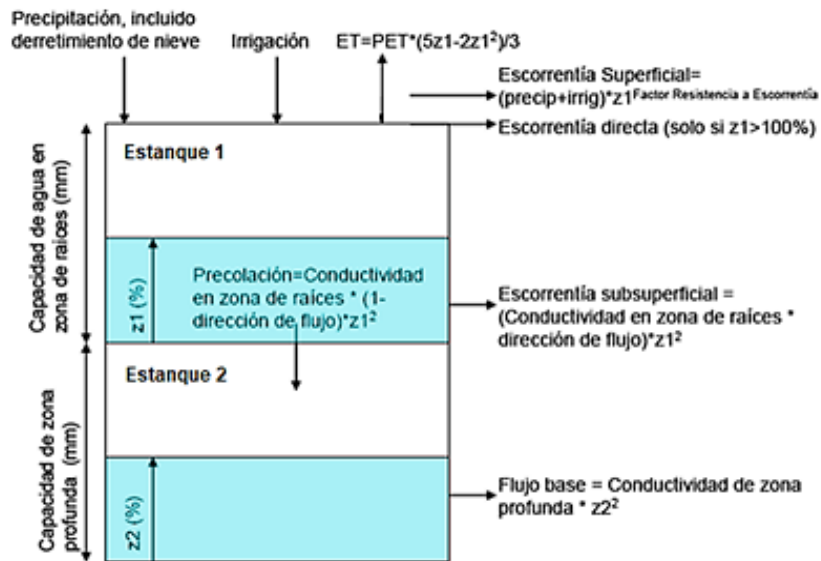


Figura 2.5 – Elementos hidrológicos modelados en *WEAP*.

Cabe destacar que, el modelo subdivide la cuenca de estudio en dos subcuencas o estanques para diferentes usos de suelo o tipos de estrato que representan la zona de raíces y la zona profunda de la cuenca respectivamente y las cuales influyen en la simulación de los procesos hidrológicos [44]. Por lo tanto, las expresiones matemáticas que describen el balance hídrico para cada estanque serán las siguientes:

- Estanque 1:

$$Sw_j * \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) * k_{c,j}(t) * \left(\frac{5 * z_{1,j} - 2 * z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) * z_{1,j}^{RRF_j/2} - f_j * k_s * z_{1,j}^2 - (1 - f_j) * k_s * z_{1,j}^2$$

- Estanque 2:

$$Dw_j * \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d * z_{1,j}^2 + (1 - f_j) * k_s * z_{2,j}^2$$

⁸ *WEAP, Two-bucket Method : Soil Moisture Method*
<https://www.weap21.org/WebHelp/index.html#Two-bucket Method.htm>

Sw_j : Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces.
 $z_{1,j}$: Nivel de humedad en la zona de raíces.
 P_e : Precipitación efectiva (mm).
 PET : Evaporación potencial de cultivo referencia, estimación de Penman – Montith (mm/día).
 $k_{c,j}$: Coeficiente de cultivo para las diferentes porciones de cobertura de suelo.
 RRF_j : Índice de resistencia a la escorrentía para cada cobertura de suelo
 k_s : Conductividad de zona de raíces [mm/t].
 f_j : Dirección preferencial de flujo.
 Dw_j : Capacidad de almacenamiento en la zona profunda.
 $z_{2,j}$: Nivel de humedad en la zona profunda.
 k_d : Conductividad de zona profunda [mm/t].

2.6. Indicadores de bondad de ajuste

Se entiende como indicador de bondad de ajuste al criterio estadístico cuantitativo que verifica el desempeño de un modelo hidrológico en términos de la precisión de los datos simulados en comparación con los valores registrados, mediante procesos de optimización [40]. Por lo tanto, para verificar este desempeño de la modelación hidrológica se realizará la calibración de la siguiente variable de interés [45]:

- Caudal: Se contrastará a nivel de cuenca los valores de escorrentía superficial simulados por modelación hidrológica con las observaciones registradas por las estaciones fluviométricas.

Los indicadores de bondad de ajuste que serán utilizados serán los siguientes:

2.6.1. Criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe

El criterio de la eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (NSE) se refiere a la estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de datos medidos [46]. Por lo que esta eficiencia indicará cuanto de la variabilidad que existe en las observaciones es explicada por la simulación, y que de manera gráfica representaría a la cantidad de datos observados se ajustan a los simulados dentro de una bisectriz del plano cartesiano.

La magnitud de la eficiencia varía desde el intervalo del infinito negativo hasta un valor unitario, donde una simulación perfecta tendrá un indicador de 1, luego entre 0 y 1 indica que el modelo representa una mejor relación que el valor medio e indicadores negativos representan que los valores medio se relacionan mejor a la simulación que los valores observados. Cabe destacar que, el NSE es adecuado para ajustes a valores medio o altos.

Por lo que para valores bajos se utiliza su expresión en condiciones logarítmicas, la denominada eficiencia de *Nash-Sutcliffe* logarítmica (NSELog), ya que está disminuye la dispersión entre los valores [47]. Las expresiones de la eficiencia de *Nash-Sutcliffe*, son las siguientes:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{obs}^{media})^2}$$

$$NSELog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Y_i^{obs} - \log Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Y_i^{obs} - \log Y_{obs}^{media})^2}$$

NSE: Eficiencia de Nash – Sutcliffe

NSELog: Eficiencia de Nash – Sutcliffe Logaritmica

Y_i^{obs} : Valor observado en el tiempo i

Y_{obs}^{media} : Valor observado medio

Y_i^{sim} : Valor simulado en el tiempo i

2.6.2. Criterio de sesgo porcentual (PBIAS)

El criterio del sesgo porcentual (PBIAS) se refiere a la tendencia promedio de los datos simulados según sus magnitudes al ser superiores o inferiores que sus contrapartes observadas [46]. El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo, y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del modelo. La expresión del sesgo porcentual es la siguiente:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})}$$

PBIAS: Sesgo Porcentual

Y_i^{obs} : Valor observado en el tiempo i

Y_i^{sim} : Valor simulado en el tiempo i

2.6.3. Criterio de eficiencia de Kling-Gupta

El criterio de la eficiencia de *Kling-Gupta* corresponde a la modificación del índice de eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (NSE), donde sus los componentes de correlación, desviación y variabilidad están ponderados de manera equitativa, resolviendo problemas sistemáticos de subestimación en los valores máximos y de poca variabilidad identificados en la función NSE [48]. Los valores de KGE varían dentro del intervalo del infinito negativo hasta el valor unitario, donde el valor más cercano a 1 indica que el modelo es más preciso. La expresión de la eficiencia de *Kling-Gupta* es la siguiente:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

KGE: Eficiencia de Kling – Gupta

r : Coeficiente de correlación lineal entre valores simulados y observados

α : Razón entre la desviación estándar simulada y observada

β : Razón entre el promedio simulado y observado

Capítulo 3

Metodología

En la siguiente figura se ilustra la estructura general de la metodología del presente trabajo:

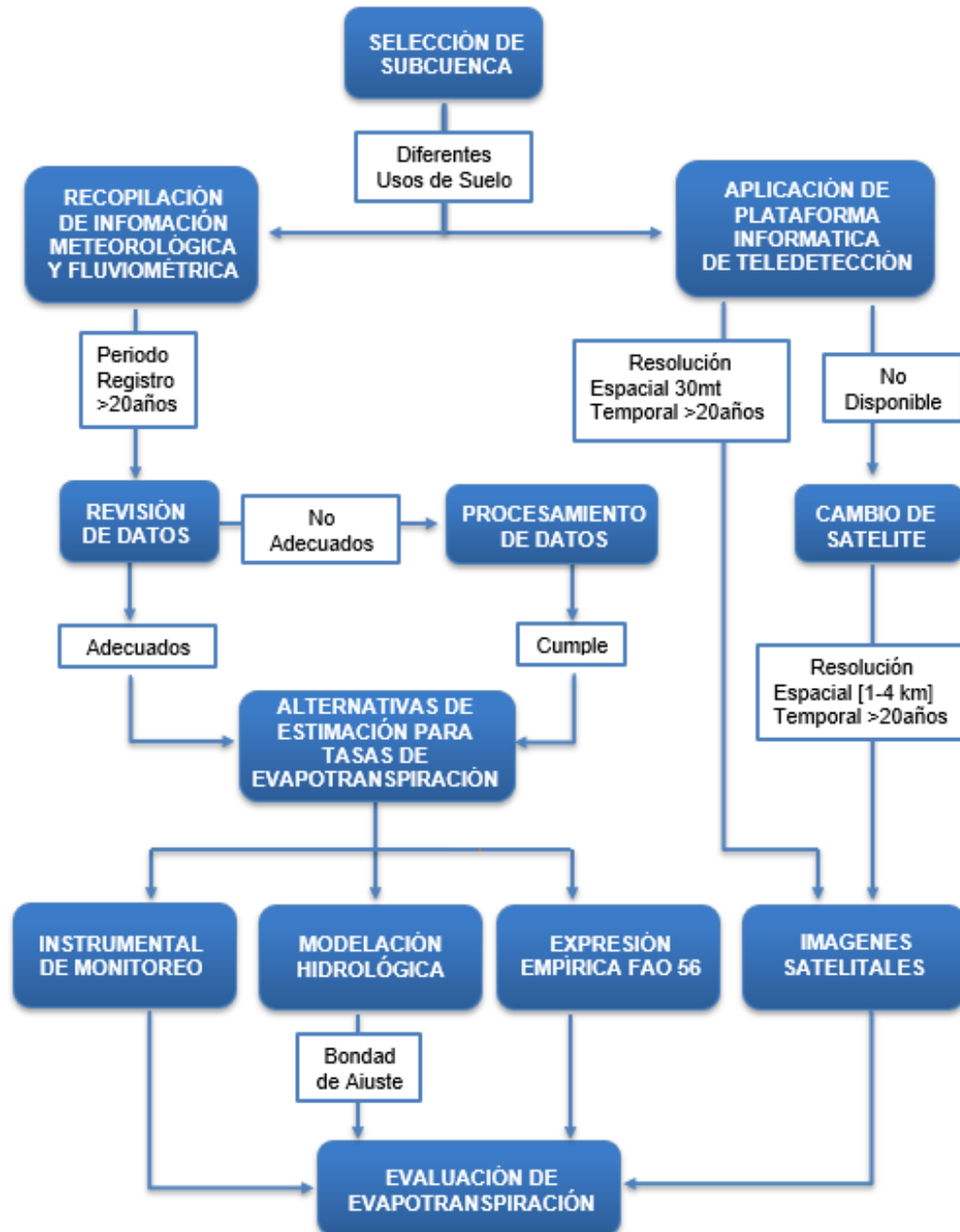


Figura 3.1 – Metodología para la evaluación de la evapotranspiración por teledetección para modelación hidrológica a nivel de cuencas hidrográficas.

Este trabajo de título consiste en evaluar el proceso de evapotranspiración registrado por capturas satelitales para la aplicación de la modelación hidrológica a nivel de cuencas hidrográficas. Por lo tanto, la metodología propuesta para este estudio será la siguiente:

- I. Comienza con la selección de las subcuencas, lo que implica la elección de una región en particular del país e identificar dos subcuencas que tengan como característica una diferencia importante en demanda evapotranspirativa, es decir, una que presente un alto uso de suelo agrícola y otra con escasa superficie de cultivos.
- II. La recopilación de información meteorológica y fluviométrica de ambas subcuencas, se refiere a la búsqueda y recolección de las variables climáticas requeridas para la estimación de *Penman-Monteith* [3] y los valores de evapotranspiración disponible por las estaciones de monitoreo vigentes, dentro de un periodo de registro superior a 20 años, además de información de forzantes climáticas (precipitación y temperatura) y registro de caudales.
- III. Los datos recolectados deben ser adecuados, es decir, registros con cantidad suficiente y calidad en la medición, por lo tanto, la revisión de datos consiste en un catastro de la recolección que, dependiendo de su cantidad y calidad, se continua con el siguiente procedimiento. Si los datos no presentan discontinuidades en los años de monitoreo en base a estaciones vigentes, serán adecuados. Por el contrario, si no se disponen de la totalidad de datos o de estaciones vigentes de monitoreo, se debe realizar un procesamiento de datos, para subsanar los errores u omisiones de medición detectados.
- IV. La aplicación de la plataforma informática de teledetección consiste en emplear el modelo *EEFLUX*, el cual solicita la identificación espacial y temporal del área de estudio que, dependiendo del periodo de registro solicitado, se selecciona la imagen que tenga a disposición según su porcentaje de cubierta nubosa. Cabe destacar que, el modelo *EEFLUX* [5] ofrece productos como evapotranspiración real, porcentaje de albedo o NDVI con una resolución espacial a 30 metros y temporal desde 1984 hasta el presente, entregando su información en formato *GeoTiff*. Ahora bien, en el caso de no disponer de las resoluciones ofrecidas por el modelo, se recurrirá a un cambio de satélite, utilizando imágenes con resoluciones espaciales con menor calidad en sus detalles visibles pero que se encuentren dentro de un periodo superior a 20 años.
- V. Al disponer de información meteorológica y fluviométrica adecuada, se establecen las alternativas de estimación disponibles para las tasas de evapotranspiración en base a variables hidrológicas. Dichas alternativas corresponden al instrumental de monitoreo [2], la modelación hidrológica [40] y la expresión empírica FAO 56 de *Penman y Monteith* [34]. Para la elección del instrumental de monitoreo, se utilizarán las mediciones del proceso de evaporación registrado por el evaporímetro de bandeja, para estimar la evapotranspiración de referencia [29] y la respectiva evapotranspiración de cultivo según el uso de suelo dominante en cada cuenca hidrográfica. De manera análoga, en la elección de la expresión empírica FAO 56 se utilizará la ecuación de *Penman y Monteith* [3]. Por su parte, la opción de la modelación hidrológica corresponde en el desarrollo del modelo *WEAP* bajo el método de la humedad del suelo [42], que según el uso de suelo presente en cada cuenca de estudio. De los cuales se obtendrán las tasas de evapotranspiración asociadas a la representación de la dinámica del suelo de cada cuenca. Para validar la confianza de la información disponible por la modelación hidrológica, se realizará la calibración de cada modelo y según el caudal observado como variable de interés, se evaluará su eficiencia según indicadores de bondad de ajuste [46],[47], tales como el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el coeficiente PBIAS y la eficiencia de Kling-Gupta [48].

- VI. La alternativa de imágenes satelitales corresponde a la evapotranspiración real proveniente de cada captura [35], (imágenes con resolución espacial de 30 [mt] y temporal superior a los 20 años, o en su defecto, con resolución espacial entre 1 a 4 [km] [38]), registradas por medio de la metodología de balance energético [19].
- VII. La evaluación de la evapotranspiración corresponderá a la comparación de las magnitudes y la temporalidad de las tasas de evapotranspiración provenientes del instrumental de monitoreo, de la expresión empírica de *Penman y Monteith* y de la modelación hidrológica con la evapotranspiración real registrada por teledetección.

Capítulo 4

Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio adoptada para la selección de las subcuencas de este trabajo fue la cuenca del Río Maule, correspondiente a la Región del Maule, cuenca que nace en la cordillera de los Andes y desemboca en el mar, correspondiente a la séptima Región de Chile. Los motivos de la elección fueron primordialmente por ser una de las regiones del país donde se concentra el desarrollo agrícola, siendo el 15 [%] de superficie nacional. Por ello, el cultivo característico de la región es el arroz, correspondiente al 83 [%] de la superficie sembrada [49].

Además, en base a la metodología de huella hídrica [50], el mayor consumo de aguas superficiales y subterráneas (huella hídrica azul) de la región se concentra en el uso agrícola y a su vez, el mayor consumo de aguas lluvias (huella hídrica verde) pertenece al sector forestal [51]. Por lo tanto, la cuenca del río Maule dispone de subcuencas con usos de suelo variados tanto en sectores agrícolas como forestales.

Por consiguiente, de la cuenca de Río Maule, se seleccionaron dos subcuencas que presentan diferencias en su uso de suelo para estudiar la discrepancia que tendrán los valores de evapotranspiración en distintos escenarios. Las subcuencas seleccionadas integran el área de drenaje Perquilauquén Alto, caracterizada por río Perquilauquén, cuerpo de agua perteneciente a la provincia de Linares, que recorre una intrincada trama de drenaje de 190 [km] desde la precordillera andina y parte de la depresión intermedia entre las comunas de Parral y San Fabián. Además, tiene un área de drenaje de 5023 [km²] caracterizada por una creciente actividad productiva al ser considerada como la zona arrocera del país [52].

Por lo antes mencionado, las subcuencas adoptadas para el estudio fueron las siguientes:

- Cuenca Estero Curiperumo en lo Hernández
- Cuenca Río Perquilauquén en San Manuel

Su caracterización corresponderá a la descripción climática, hidrológica, topográfica, de uso de suelo y de disponibilidad de información hidrometeorológica.

4.1. Cuenca estero Curiperumo en lo Hernández

Cuenca hidrográfica ubicada al sureste de la ciudad de Parral con dirección norponiente entre las comunas de Parral y Retiro de la provincia de Linares, tal como se ilustra en la figura 4.1. Su área de drenaje con desembocadura al Río Perquilauquén es de 216,9 [km²], la cual posee un nivel de elevación máximo de 205 [m.s.n.m.] hasta su punto de drenaje de 105 [m.s.n.m.], y con una pendiente media 0,0522 [m/m] aproximadamente.

Además, la cuenca presenta un grado de sequedad del clima o índice de aridez de 1,4, valor que se encuentra clasificado como zona árida [53]. Se caracteriza por tener usos de agua extractivos destinados para el riego [54] de superficies de cultivo con predominio de cereales [49]. Se encuentra controlada fluviométricamente por la estación de Estero Curipeumo en lo Hernández que encuentra vigente desde el año 1968, la cual se encuentra ubicada a 36°00'57" latitud sur y 71°59'54" de longitud.

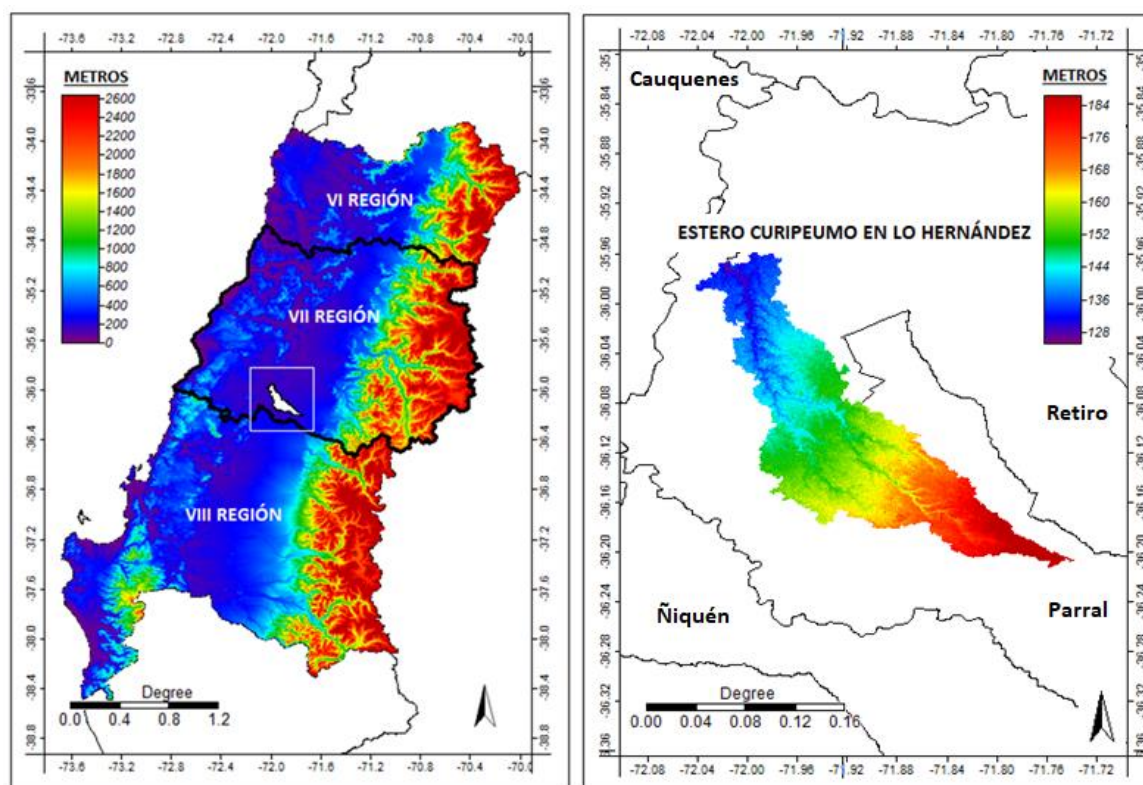


Figura 4.1 – Ubicación de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

4.1.1. Clima e hidrología

Según la clasificación de Köppen modificada, la cuenca de Estero Curipeumo en lo Hernández, tendrá la presencia de climas del tipo “Csc” desde el oriente y del tipo “Csb” hacia el poniente, lo cuales corresponden a clima templado frío y templado cálido junto a lluvias invernales respectivamente [55].

Hidrográficamente, su red de drenaje principal corresponde al Estero Curipeumo, el cual recorre 36 [km] de trayecto desde el oriente a dirección norponiente dentro de su delimitación de subcuencas inferiores a 70 [km²] en lanchas planas o de escaso calado [56] con desembocadura al Río Perquilauquén, tributario del Río Loncomilla de la cuenca del Río Maule , tal como se muestra en la siguiente figura:

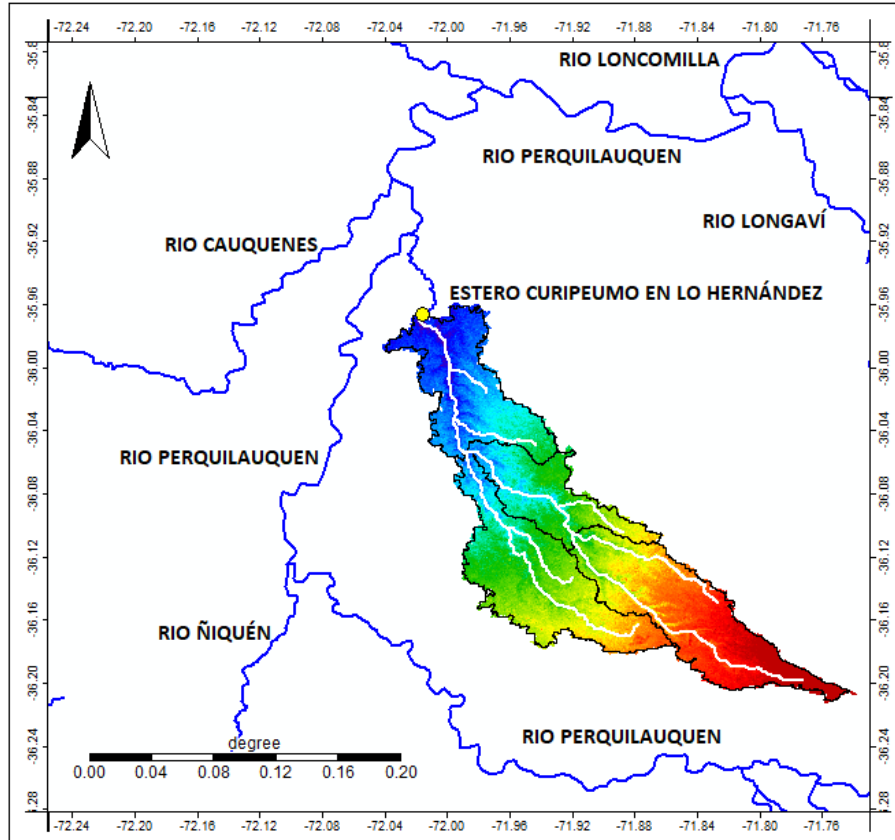


Figura 4.2 – Hidrografía de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Dentro de sus características meteorológicas disponibles en la plataforma Explorador Solar⁹, la cuenca presenta una temperatura media anual de 13,57 [°C], con temperaturas máximas sobre los 18 [°C] y mínimas bajo los 9,5 [°C]. Además, posee un porcentaje de frecuencia de nubosidad media anual de 11,81 [%] de cobertura, siendo el periodo con mayor cobertura de nubosidad entre los meses de mayo a agosto. Su velocidad media anual de viento medida sobre los diez metros sobre el nivel del mar es de 2,4 [m/s], siendo el mes de junio con mayor velocidad de viento de 3,0 [m/s] y una radiación solar media anual de 5,14 [kWh/m²/día] correspondiente a la radiación global horizontal. Ahora bien, un análisis hidrológico de la cuenca considerando los registros de la estación de monitoreo Estero Curipeumo en lo Hernández, estima una precipitación media anual de 948 [mm] para mediciones desde 1980 hasta el año 2016 y un caudal medio anual de 3,32 [m³/s] dentro de un periodo de estudio desde 1960 hasta el 2016 [57]. Se identifica que el régimen que presenta la cuenca Estero Curipeumo en lo Hernández es pluvial con caudales superiores en meses de invierno producto de lluvias invernales y caudales menores en periodos estivales, tal como se aprecia en la curva de variación estacional correspondiente a dicha estación de monitoreo [54].

⁹ Explorador Solar, Explorador Recurso Solar y Datos Meteorológicos
<http://solar.minenergia.cl/exploracion>

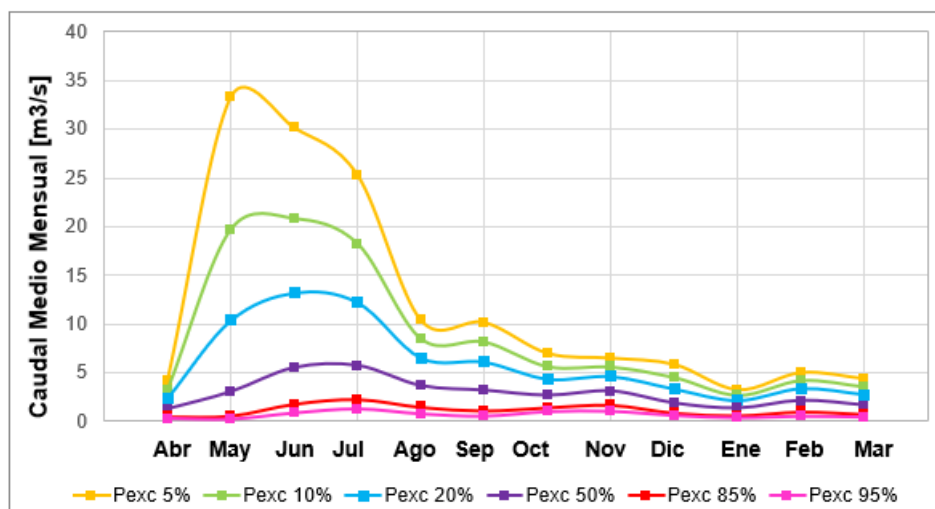


Figura 4.3 – Curva de variación estacional de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, periodo 1960-2016.

4.1.2. Derechos de agua

Los derechos de agua identificados en la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, se encuentran disponibles en las plataformas Observatorio Georreferenciado DGA¹⁰ implementada por la Dirección General de Aguas (DGA) y CAMELS-CL¹¹ (*Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset*), desarrollada por el Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2). La información de las demandas de aguas registradas, corresponden a usos extractivos con derechos consuntivos ejercidos de manera permanente y eventual de fuentes subterráneas para uso de riego agrícola y consumo humano, tal como se muestran en el Anexo 1.

4.1.3. Hidrogeología

La cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, dispone en su subsuelo, la presencia del acuífero denominado Perquilauquén Norte. Formación geológica del tipo freático con sectores confinados de una superficie de 1105,4 [km²]. Además, posee un coeficiente de almacenamiento entre 0,08 a 0,12 [58], una conductividad hidráulica de 10,3 a 19,0 [m/día] y una transmisibilidad que se sitúa en el rango de 100 a 7800 [m²/día] [59]. La figura que ilustra la disposición del acuífero se muestra en el Apéndice 1.

4.1.4. Topografía

La cuenca se encuentra delimitada en la depresión intermedia de la Región del Maule, con una superficie con características de planicie suavemente ondulada y saturadas producto de las condiciones de riego y climáticas que imperan a lo largo de la cuenca, lo que favorece a sus suelos para la explotación agrícola [55].

¹⁰ Observatorio Georreferenciado DGA, Derechos de Agua

<https://snia.mop.gob.cl/observatorio/>

¹¹ CAMELS-CL, *Catchment Attributes*

<http://camels.cr2.cl>

Considerando, el modelo de elevación digital *DEM ALOS-PALSAR* disponible por la plataforma de infraestructura de datos geospaciales de Chile [60] con resolución espacial de 12,5 metros, la representación gráfica de la variación de la elevación por porcentaje de área acumulada de la cuenca es la siguiente:

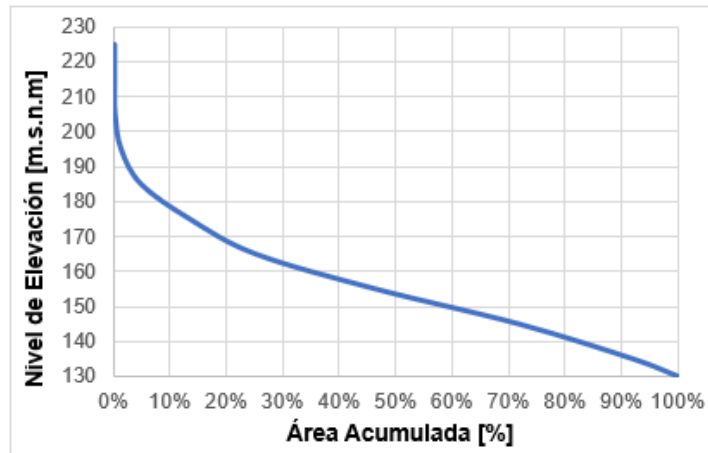


Figura 4.4 – Curva hipsométrica de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

De acuerdo con la figura 4.4, la curva hipsométrica es extendida por lo que se infiere que la cuenca posee una distribución gradual de sus elevaciones teniendo un porcentaje inferior del 10 [%] de altitudes sobre los 180 metros, lo que confirma su característica de planicie suavemente ondulada a lo largo de su superficie [55]. Adicionalmente, las bandas de elevación que caracterizan la topografía de la cuenca se ilustran en la siguiente figura:

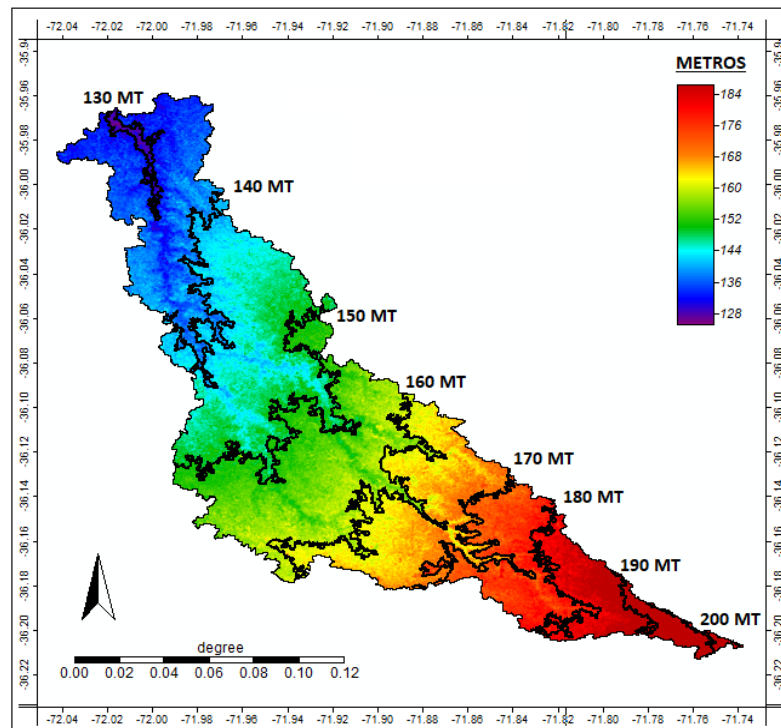


Figura 4.5 – Bandas de elevación de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

4.1.5. Uso de suelo

La superficie de la cuenca Estero Curipeumo en lo Hernández se dispone para el desarrollo de la producción agrícola dadas sus condiciones climáticas, topográficas y de suelo sedimentarios de textura superficial franco arcillosa [55]. Ahora bien, como antecedente preliminar de la caracterización del uso de suelo de la cuenca de estudio, la plataforma de información integrada por cuencas CAMELS-CL (*Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset*) elaborada por el Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia “CR2”, establece que más del 50 [%] de su superficie es de terrenos agrícolas. Lo anterior coincide con, la representación espacial adoptada de la clasificación de los usos de suelo y vegetación es la elaborada por la Corporación Nacional Forestal “CONAF”¹² en el año 2011 y actualizada en año 2016, la cual entrega la siguiente clasificación:

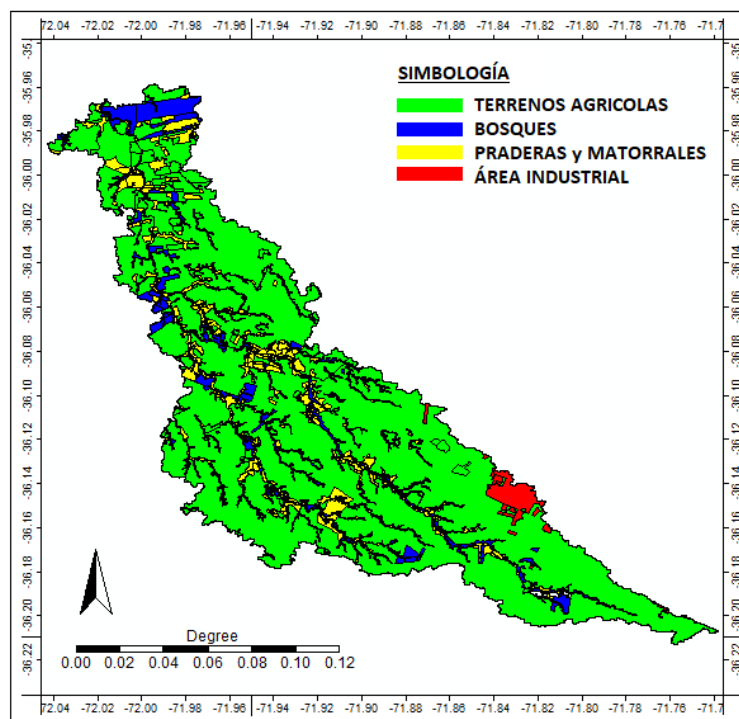


Figura 4.6 – Uso de suelos de cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

De la figura anterior, es posible apreciar que existe una preponderancia del terreno agrícola con un 78 [%] aproximadamente de superficie, el porcentaje restante se divide entre praderas y matorrales, sectores de bosque nativo e industrial. De manera adicional, la información específica de la variabilidad del uso de suelo agrícola y forestal disponible por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias “ODEPA”¹³ correspondiente a cada comuna del país, complementa la caracterización espacial anterior. Así, la clasificación del uso de suelo de la cuenca de Estero Curipeumo en lo Hernández corresponde a terrenos agrícolas de cultivos anuales para cereales, siendo el arroz el cultivo mayoritario y con respecto al sector de bosques, presenta plantación forestal de eucalipto.

¹² CONAF, Catastro de Usos de Suelo y Recursos Vegetacionales.

<http://www.ide.cl/index.php/flora-y-fauna/item/1513-catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion>

¹³ ODEPA, Sistema de Consulta Estadístico Territorial

<https://icet.odepa.gob.cl>.

4.2. Cuenca río Perquillauquén en San Manuel

Cuenca hidrográfica ubicada dentro del límite geográfico de las regiones del Maule y del Biobío, entre las provincias de Parral y San Fabián respectivamente, tal como se ilustra en la siguiente figura:

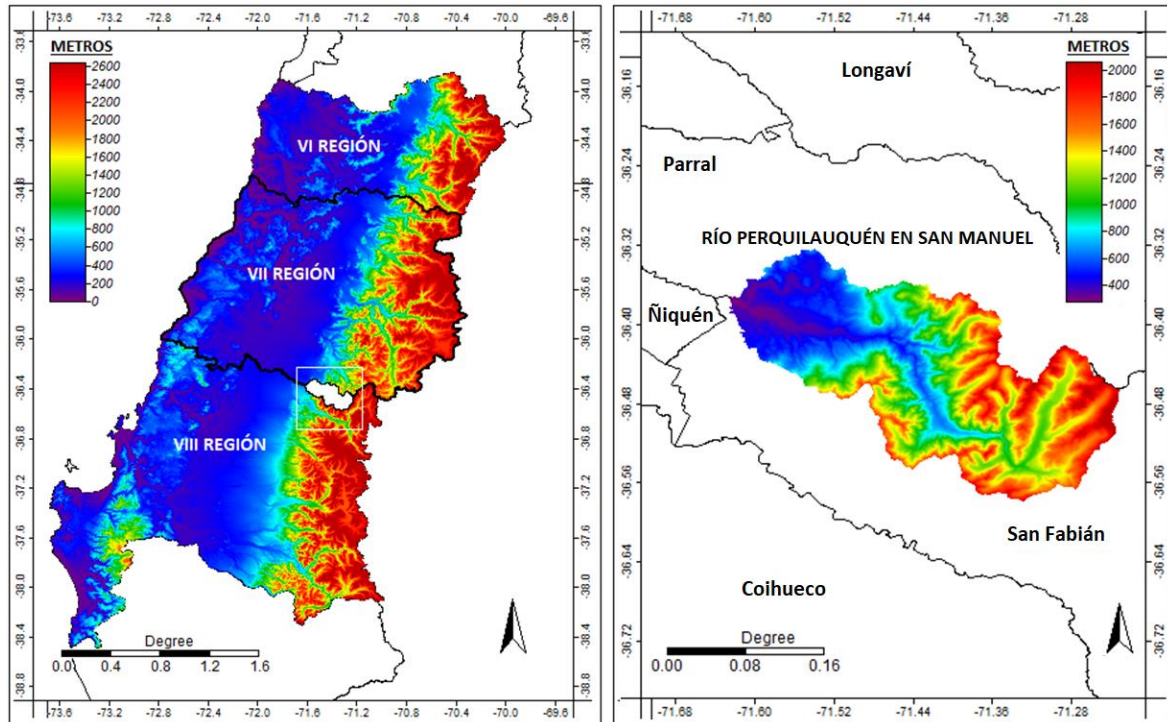


Figura 4.7 – Ubicación de cuenca río Perquillauquén en San Manuel.

Área de drenaje del Río Perquillauquén de 502,4 [km²], la cual posee un nivel de elevación máximo de 2230 [m.s.n.m.] hasta su punto de drenaje de 281 [m.s.n.m.], con una pendiente media 0,2237 [m/m] aproximadamente. Particularmente, la cuenca presenta un grado de sequedad del clima o índice de aridez de 0,5, valor que representa una clasificación se zona húmeda [53]. Con respecto a la demanda hídrica, la actividad agrícola e industrial de la región se concentra en la ciudad de Talca, Linares y Parral, utilizando los afluentes o cursos de agua tributarios al Río Loncomilla, por lo que la demanda de agua no afecta aguas arriba del Río Perquillauquén [61]. Se encuentra controlada fluviométricamente por la estación Río Perquillauquén en San Manuel, la cual se encuentra vigente desde el año 1963, ubicada a 36°22'36" latitud sur y 71°37'27" longitud oeste.

4.2.1. Clima e hidrología

El clima de la zona entre ambas regiones desde su depresión intermedia con dirección oriente, es mediterráneo en transición a mediterráneo lluvioso con condiciones climáticas de temperatura cercanas a los 0 [°C], lo que favorece la formación de nieve, aunque no lo suficiente por ser una zona precordillerana andina [61]. Según la clasificación de Köppen modificada, la cuenca de Río Perquillauquén en San Manuel, tendrá la presencia de climas del tipo "Csc-ETH" desde el oriente y del tipo "Csb" hacia el poniente, lo cuales corresponden a clima templado frío con formación de nieve por efectos de la altura y templado cálido junto con lluvias invernales [56],[62].

Hidrográficamente, la cuenca pertenece al Río Perquillauquén en dirección aguas arriba entre las provincias de Parral y San Fabián con punto de salida situado a 280 m.s.n.m. donde tributa con el Río Longaví, dando origen al Río Loncomilla [61]. La red hidrográfica principal recorre 119 [km] aproximadamente con afluentes a lo ancho de la cuenca, tal como se muestra en la siguiente figura:

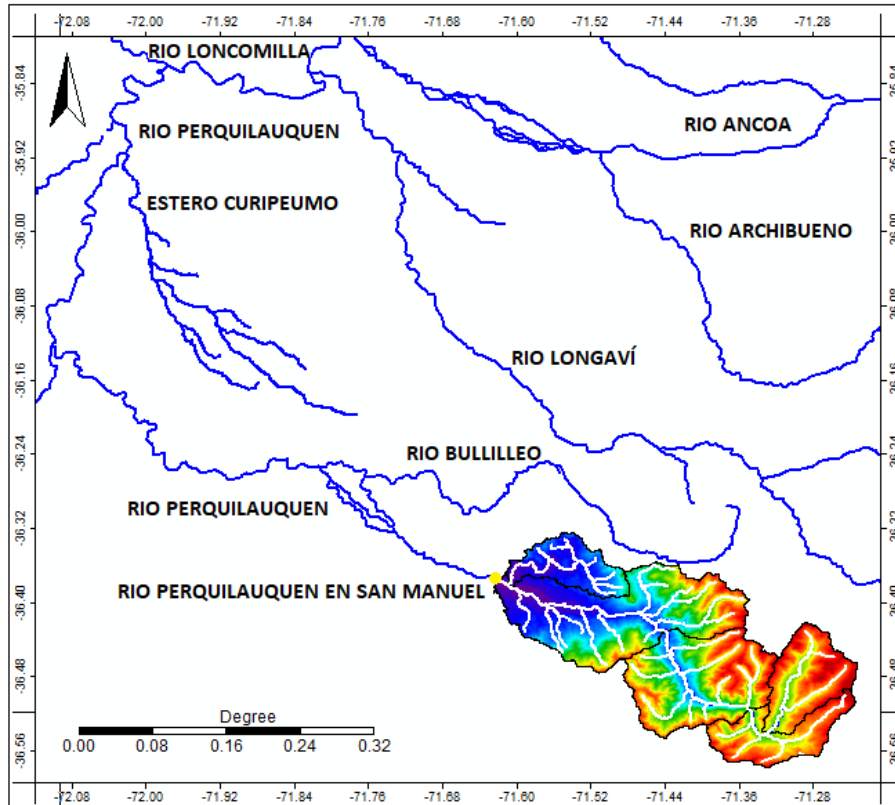


Figura 4.8 – Hidrografía de cuenca río Perquillauquén en San Manuel.

Dentro de sus características meteorológicas disponibles en la plataforma Explorador Solar, la cuenca presenta una temperatura media anual de 13,2 [°C], con temperaturas máximas sobre los 16 [°C] y mínimas bajo los 9 [°C]. Además, posee un porcentaje de frecuencia de nubosidad media anual de 13 [%] de cobertura, siendo el periodo con mayor cobertura de nubosidad entre los meses de mayo a octubre. Su velocidad media anual de viento medida sobre los diez metros sobre el nivel del mar es de 1,8 [m/s], siendo los meses de junio a agosto con mayor velocidad de viento de 2,6 [m/s] y una radiación solar media anual de 5,02 [kWh/m²/día] correspondiente a la radiación global horizontal.

El análisis hidrológico de la cuenca, considerando los registros de la estación de monitoreo Río Perquillauquén en San Manuel, estima una precipitación media anual de 2067 [mm] para mediciones desde 1980 hasta el año 2016, con un caudal medio anual de 31,3 [m³/s] dentro de un periodo de estudio desde 1960 hasta el 2016 [57]. La cuenca presenta un régimen pluvial con aporte nival, debido a la diferencia que existe entre sus caudales de periodos invernales con los estivales, ya que en los meses de mayo y junio presentan los mayores caudales producto de precipitaciones de forma líquida a diferencia de meses de septiembre a diciembre, tal como se aprecia en la curva de variación estacional correspondiente a dicha estación de monitoreo [54].

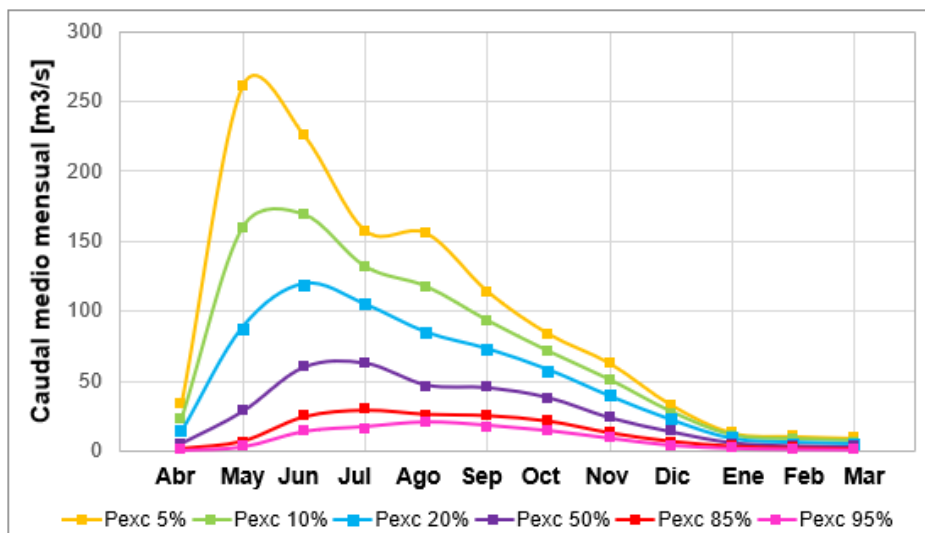


Figura 4.9 – Curva de variación estacional de cuenca río Perquillauquén en San Manuel, periodo 1960-2016.

4.2.2. Derechos de agua

Los derechos de agua identificados en la cuenca río Perquillauquén en San Manuel, se encuentran disponibles en las plataformas Observatorio Georreferenciado DGA implementada por la Dirección General de Aguas (DGA) y CAMELS-CL (Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset), desarrollada por el Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2). Dentro de esta información, las demandas de aguas corresponden a derechos concedidos para uso consuntivo y no consuntivo con ejercicio permanente y eventual; destaca que los derechos consuntivos se concentran en las cercanías del punto de drenaje de la cuenca para fines agrícolas [59],[61]. El detalle de los derechos de agua se encuentra en el Anexo 1.

4.2.3. Hidrogeología

En la cuenca río Perquillauquén en San Manuel, existe la presencia de un acuífero denominado Río Perquillauquén, ubicado en las cercanías del punto de drenaje de la cuenca. Dentro de sus atributos, posee un espesor de 45 [m] y un coeficiente de almacenamiento de 0,08 aproximadamente [61]. Esta formación geológica pertenece a la extensión del acuífero Ñiquén-Perquillauquén en dirección suroeste de subsuelo de la cuenca Río Perquillauquén en Ñiquén. Acuífero de tipo freático con sectores confinados de 673,6 [km²], que tiene una transmisibilidad que se sitúa en el rango de 10 a 360 [m²/día], una conductividad hidráulica de 0,51 a 14,6 [m/día] [59] y un coeficiente de almacenamiento que se encuentra entre 0,05 a 0,09 [58]; rango correspondiente al coeficiente del acuífero Río Perquillauquén [61]. La figura que ilustra la disposición del acuífero se muestra en el Apéndice 1.

4.2.4. Topografía

La cuenca se encuentra delimitada dentro de la precordillera andina y la depresión intermedia del límite geográfico entre las provincias de Parral en la VII región y de San Fabián en la VIII región. Su superficie presenta pendientes moderadas que aumentan con laderas abruptas, cursos de agua encajonados de estratos arcillosos y cerros de bosque nativo en dirección a la precordillera [56], [62].

Considerando, el modelo de elevación digital DEM ALOS-PALSAR disponible por la plataforma de infraestructura de datos geospaciales de Chile [60] con resolución espacial de 12,5 metros, la representación gráfica de la variación de la elevación por porcentaje de área acumulada de la cuenca es la siguiente:

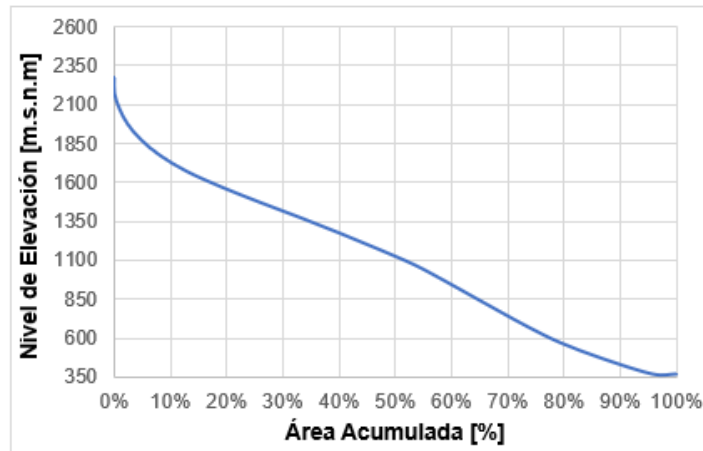


Figura 4.10 – Curva hipsométrica de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

De acuerdo con la figura 4.4, la curva hipsométrica es ascendente, lo que infiere que la superficie sufre cambios bruscos de elevación, ya que más del 50 [%] de su área acumulada presenta altitudes sobre los 1000 [m.s.n.m.], validando su característica de tener laderas abruptas [56], [62]. Producto del tamaño de la cuenca y su creciente variación de altitud, se dispone de las bandas de elevación para caracterizar su topografía (Figura 4.11).

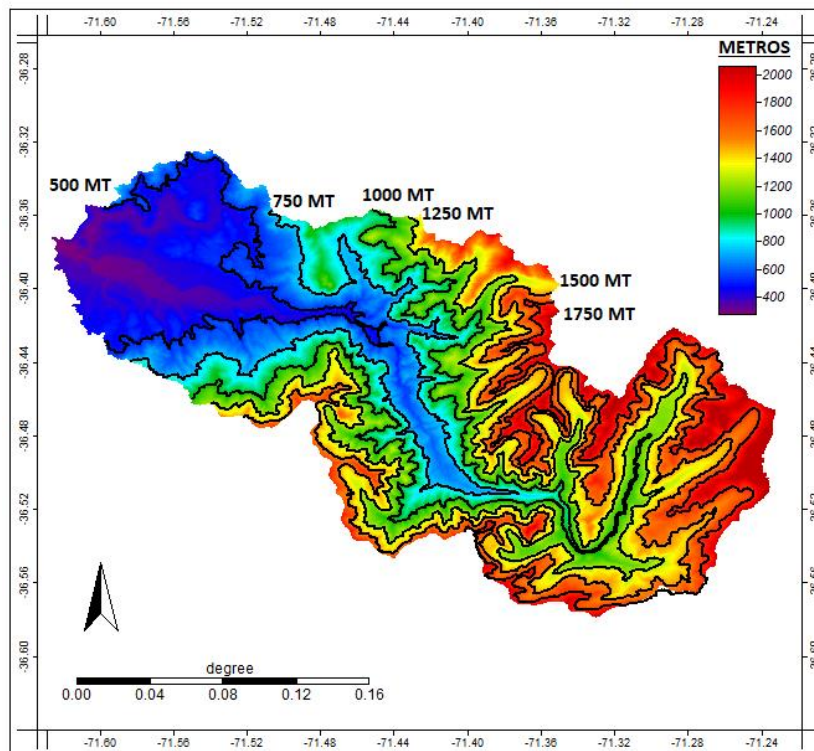


Figura 4.11 – Bandas de elevación de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

4.2.5. Uso de suelo

La cuenca de Río Perquilauquén en San Manuel dispone inicialmente de sectores agrícolas cercanos a su punto de drenaje, seguido de abundante plantación forestal de origen nativo que terminan con áreas desprovistas de vegetación con presencia de nieves en las zonas más altas de la cuenca, sobre suelos de origen aluvial [61].

Ahora bien, como antecedente preliminar para la caracterización del uso de suelo de la cuenca de estudio, la plataforma de información integrada por cuencas CAMELS-CL, identifica que más del 40 [%] de su superficie posee bosques nativos seguido de un 30 [%] de matorrales.

La información anterior es consistente con la representación espacial adoptada de la clasificación de los usos de suelo y vegetación es la elaborada por la Corporación Nacional Forestal “CONAF” en el año 2011 y actualizada en año 2016, la cual entrega la siguiente clasificación:

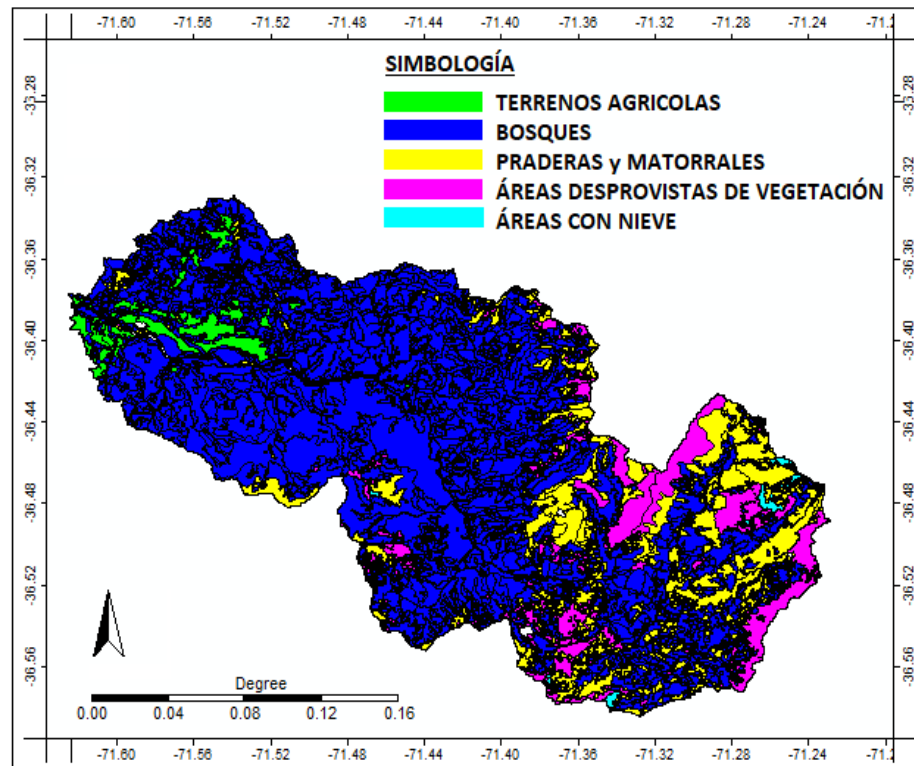


Figura 4.12 – Uso de suelos de cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

De la figura anterior, se aprecia una abundante extensión bosques con sectores concentrados de agricultura a la salida de la cuenca, de praderas y matorrales junto áreas desprovistas de vegetación con cúmulos de nieve en bandas de elevación sobre los 1500 [m.s.n.m.]. Además, la información específica de la variabilidad del uso de suelo agrícola y forestal disponible por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias “ODEPA” correspondiente a cada comuna del país, complementa la caracterización espacial anterior. Así, la clasificación del uso de suelo de la cuenca de Río Perquilauquén en San Manuel corresponde a los bosques de origen nativo de la especie Pino Radiata, con su sector agrícola de cultivos anuales para cereales como el trigo.

4.3. Información disponible

Corresponde a la información meteorológica, fluviométrica y por teledetección que se encuentran disponible para cada la cuenca de estudio. Indicando su fuente, estado, ubicación y metodología de relleno y ampliación de mediciones meteorológicas si corresponda.

4.3.1. Información meteorológica

Dentro de la información meteorológica¹⁴ utilizada para el desarrollo de la modelación hidrológica, considerando un periodo de estudio elegido de mediciones superiores a 20 años, se recopilamos variables climáticas como temperatura diaria máxima y mínima, precipitación mensual, radiación global horizontal mensual, velocidad del viento mensual y evaporación diaria. Cabe destacar que, la metodología utilizada para el relleno de datos es el método de regresión lineal simple entre estaciones, considerando correlaciones mayores a 0,7 [63]. La expresión del método de regresión lineal para el relleno de datos es la siguiente:

$$X_{i,t} = \alpha_{i,j} * X_{j,t} + \beta_{i,j}$$

X: Variable Meteorológica.

i: Estación de monitoreo completa.

j: Estación de monitoreo incompleta.

$\alpha_{i,j}$: Parámetro de la regresión lineal, pendiente.

$\beta_{i,j}$: Parámetro de la regresión lineal, intercepto.

Por consiguiente, el detalle del instrumental de monitoreo correspondiente a cada cuenca se muestra en las siguientes Tablas e ilustraciones:

Tabla 4.1 – Catastro de las estaciones meteorológicas de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Cód. BNA	Nombre Estación	Ubicación			Altura [m.s.n.m]	Vigencia	Fuente
		Comuna	Lat.Sur	Lon.W.			
7340003-1	Los Huiganes de Curipeumo	Parral	36° 00'	71° 59'	126	1994 - /	DGA
7345001-2	Parral	Parral	36° 11'	71° 49'	175	1964 - /	DGA – EC*
7335004-2	Quella	Cauquenes	36° 03'	72° 05'	130	1961 - /	DGA – EC*
7352002-9	La sexta de Longaví	Longaví	36° 06'	71° 36'	229	1990 - /	DGA
7352003-7	Liguay	Linares	35° 56'	71° 41'	104	1975 - /	DGA

* EC : Plataforma explorador climático.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2 – Variables climáticas disponibles por estación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Nombre Estación	Temperatura Max. Diaria	Temperatura Min. Diaria	Evaporación Diaria	Precipitación Mensual	Caudal Medio Mensual
Los Huiganes de Curipeumo				x	
Parral	x *	x	x	x	
Quella				x	
La sexta de Longaví				x	
Liguay			x	x	
Estero Curipeumo en lo Hernández					x

* X : Información disponible por estación.

Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ Dirección General de Aguas, Información Oficial Hidrometeorológica
<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>.

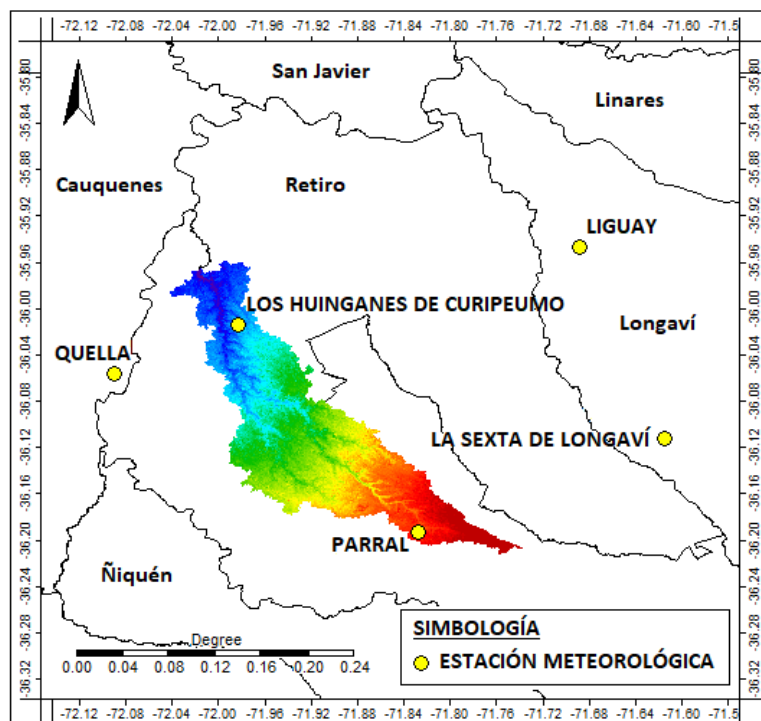


Figura 4.13 – Estaciones meteorológicas disponibles, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Tabla 4.3 –Catastro de las estaciones meteorológicas de la cuenca río Perquillauquén en San Manuel

Cód. BNA	Nombre Estación	Ubicación			Altura [m.s.n.m]	Vigencia	Fuente
		Comuna	Lat.Sur	Lon.W.			
7331002-4	Digua Embalse	Parral	36° 15'	71° 32'	390	1947 - /	DGA – EC*
7350001-K	Río Longaví en la Quiriquina	Longaví	36° 13'	71° 27'	499	1966 - /	DGA
7350006-0	Bullilleo Embalse	Parral	36° 17'	71° 24'	600	1930 - /	DGA
7332003-8	San Manuel en Perquillauquén	Parral	36° 22'	71° 36'	270	1956 - /	DGA
8113001-9	Coihueco Embalse	Coihueco	36° 38'	71° 47'	314	1971 - /	DGA
8105004-K	Caracol	San Fabian	36° 39'	71° 23'	610	1987 - /	DGA
8106003-7	San Fabián	San Fabian	36° 35'	71° 31'	465	1956 - /	DGA
8105005-8	Camán	Quillón	36° 40'	71° 17'	670	1991 - /	DGA

* EC : Plataforma explorador climático ¹⁵

Fuente: Elaboración propia.

¹⁵ Explorador Climático -CR2.

<http://explorador.cr2.cl/>

Tabla 4.4 – Variables climáticas disponibles por estación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Nombre Estación	Temperatura Max. Diaria	Temperatura Min. Diaria	Evaporación Diaria	Precipitación Mensual	Caudal Medio Mensual
Digua Embalse	x	x	x	x	
Guayquivilo	x	x			
Río Longaví en la Quiriquina				x	
Bullileo Embalse			x	x	
San Manuel en Perquilauquén				x	
Caracol	x	x	x	x	
San Fabian				x	
Camán				x	
Río Perquilauquén en San Manuel					x

Fuente: Elaboración propia.

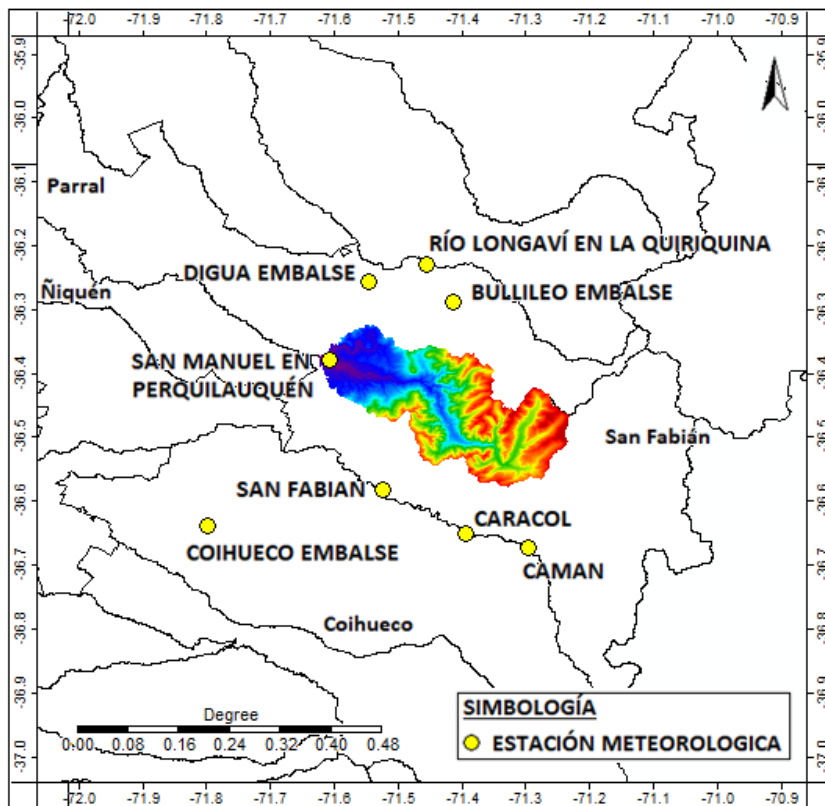


Figura 4.14 – Estaciones meteorológicas disponibles, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Cabe destacar que, la información meteorológica disponible para ambas cuencas de estudio se especifica en las Tablas 4.2 y 4.4. Por consiguiente, no se logró recopilar la información meteorológica correspondiente a la radiación solar entrante, debido a la ausencia de estaciones meteorológicas que registren esta variable climática dentro o en las cercanías de ambas cuencas de estudio, incluyendo a verificación de las redes de estaciones de monitoreo pertenecientes al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

4.3.2. Distribución espacial de variables meteorológicas

Corresponde a la caracterización de la distribución espacial de las variables meteorológicas, tales como la precipitación y la temperatura dentro de cada cuenca de estudio [64]. La identificación dependerá de la disponibilidad de estaciones meteorológicas dentro o en las cercanías de cada cuenca y su altitud en comparación a las elevaciones presentes.

i. Precipitación

Con respecto a la cuenca del estero Curipeumo en lo Hernández, su variabilidad de precipitación será por medio del método de la regresión lineal con las estaciones meteorológicas de “Parral” y de “Quella”, las cual poseen información continua sin vacíos en sus registros dentro del periodo de estudio y altitudes que representan las elevaciones máximas y mínimas de la cuenca, tal como se muestran en la Tabla 4.1 y la Figura 4.13.

Por consiguiente, para el caso de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, las estaciones meteorológicas disponibles se encuentran fuera de la delimitación de la cuenca (Figura 4.14) y sus altitudes no satisfacen la totalidad de las bandas de elevación (Tabla 4.2, Figura 4.11). Por lo tanto, la estimación del gradiente altitudinal de precipitación mensual [64] representativo de la cuenca es por medio del método de regresión lineal de la precipitación mensual promedio de cada estación disponible con sus respectivas altitudes. El gradiente mensual promedio de precipitación, con sus respectivas ecuaciones, son las siguientes:

Tabla 4.5 – Gradiente mensual promedio de precipitación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Mes	Gradiente [mm/mt]	Ecuación *	R ² **
Enero	0,0229	$y = 0,0229x + 7,6819$	0,53
Febrero	0,0279	$y = 0,0279x + 18,8$	0,33
Marzo	0,0314	$y = 0,0314x + 19,84$	0,52
Abril	0,1158	$y = 0,1158x + 57,183$	0,57
Mayo	0,3047	$y = 0,3047x + 121,82$	0,83
Junio	0,427	$y = 0,427x + 178,46$	0,79
Julio	0,3965	$y = 0,3965x + 97,887$	0,83
Agosto	0,3222	$y = 0,3222x + 97,491$	0,76
Septiembre	0,1691	$y = 0,1691x + 75,566$	0,72
Octubre	0,1143	$y = 0,1143x + 51,725$	0,55
Noviembre	0,0619	$y = 0,0619x + 17,397$	0,44
Diciembre	0,0569	$y = 0,0569x + 12,423$	0,58

* Variable x: Altitud; Variable y: Precipitación.

** R² : Coeficiente Determinístico

Fuente: Elaboración propia.

ii. Temperatura

Para la variabilidad de temperatura representativo para ambas cuencas de estudio, se utilizó el gradiente adiabático saturado de $\pm 6,5$ [°C/km] [65], debido a que cada cuenca dispone de únicamente una estación meteorológica con información continua dentro del periodo de estudio para estimar la distribución de temperatura. Para el caso de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, es la estación meteorológica de “Parral” y para la cuenca de río Perquilauquén en San Manuel, corresponde la estación “Digua Embalse”.

4.3.3. Información fluviométrica

Las estaciones de monitoreo encargadas de registrar la cantidad de caudal que lleva el curso de agua representativo para cada cuenca de estudio, se detallaran en las siguientes Tablas:

Tabla 4.6 –Catastro de las estaciones fluviométricas de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Cód. BNA	Nombre Estación	Ubicación			Altura	Vigencia	Fuente
		Comuna	Lat. Sur	Lon. W.	[m.s.n.m]		
7335002-6	Estero Curipeumo en lo Hernández	Retiro	35° 58'	72° 01'	105	1968 - /	DGA

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7 –Catastro de las estaciones fluviométricas de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Cód. BNA	Nombre Estación	Ubicación			Altura	Vigencia	Fuente
		Comuna	Lat. Sur	Lon. W.	[m.s.n.m]		
7330001-0	Río Perquilauquén en San Manuel	Parral	36° 22'	71° 37'	280	1963 - /	DGA

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Información por teledetección

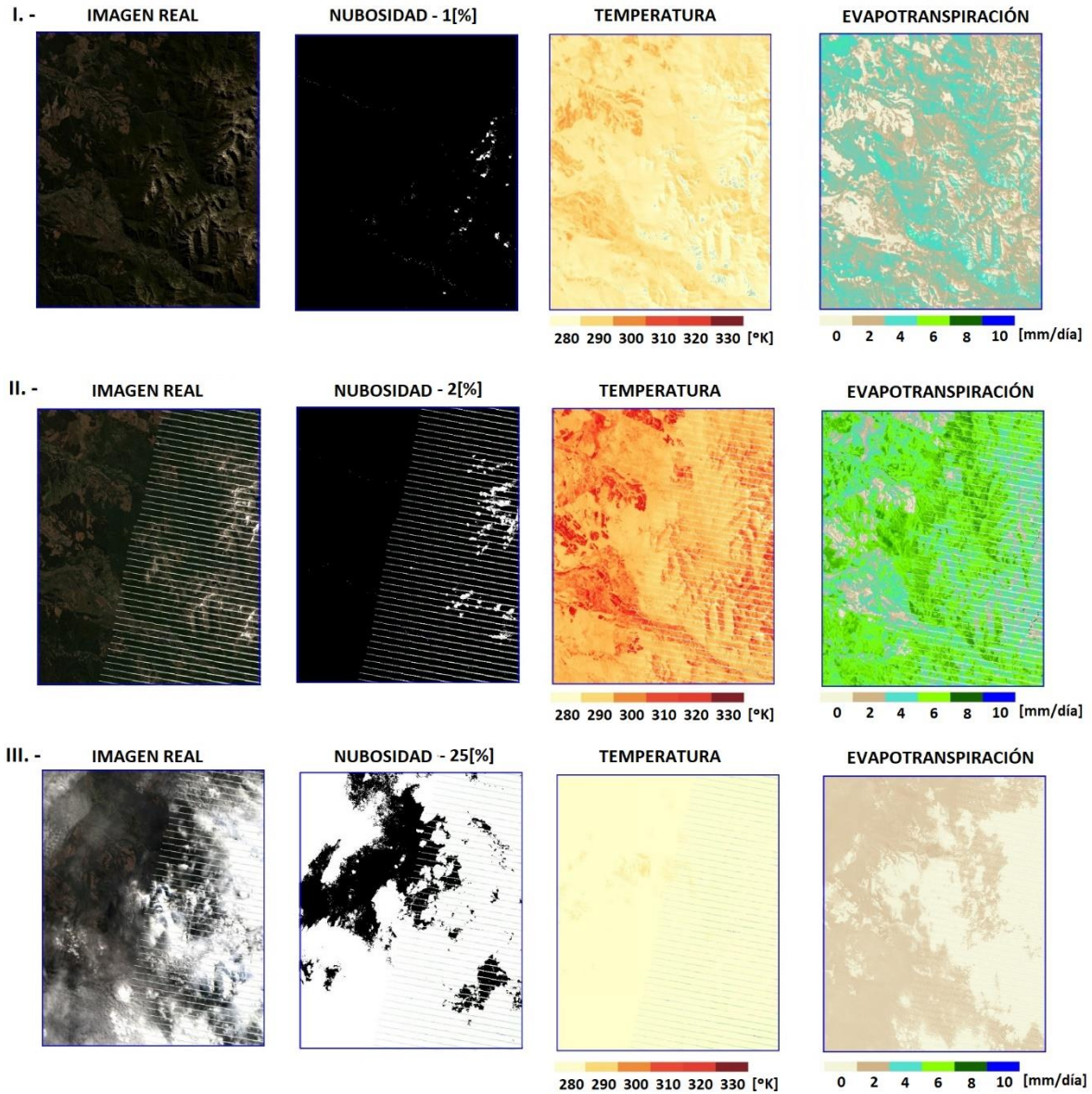
Disponibles en la plataforma computacional de acceso liberado perteneciente a la herramienta *Google Earth Engine*, el modelo *EEFLUX (Earth Engine Evapotranspiration Flux)* ofrece la capacidad obtener la información satelital del proceso de evapotranspiración con una resolución espacial de 30 metros y temporal desde el año 1984 [5]. Sin embargo, dependiendo de la ubicación dentro de la captura, la presencia de nubosidad o el efecto *Gaps* (baneado) de las imágenes provenientes del error en el sensor ETM+ del satélite Landsat 7 [66], se identificará la totalidad de imágenes que podrán ser utilizadas para este estudio. El catastro de las imágenes satelitales disponibles se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 4.8 –Catastro de imágenes satelitales en la zona de estudio.

Periodo de Capturas		1998 - 2019	
Número de Imágenes Satelitales Disponibles		256	
Estero Curipeumo en lo Hernández		Río Perquilauquén en San Manuel	
<u>Cobertura de Nubosidad por Captura</u>			
Rango	N.º Imágenes	Rango	N.º Imágenes
< 5 [%]	128	< 5 [%]	103
5 [%] - 10 [%]	38	5 [%] - 10 [%]	42
10 [%] - 20 [%]	38	10 [%] - 20 [%]	52
20 [%] - 30 [%]	17	20 [%] - 30 [%]	23
30 [%] - 40 [%]	10	30 [%] - 40 [%]	11
40 [%] - 50 [%]	12	40 [%] - 50 [%]	12
> 50 [%]	13	> 50 [%]	13
<u>Imágenes Baneadas (Gaps)</u>			
Periodo	2003 - 2019	Periodo	2003 - 2019
Cantidad	126	Cantidad	161
Porcentaje	49 [%]	Porcentaje	63 [%]
Número de Imágenes Satelitales Utilizadas		233	

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 4.8, se escogió un total de 233 imágenes satelitales para cada área de estudio, debido a que se descartaron las capturas con coberturas de nubosidad superiores a un 40 [%], ya que, desde este porcentaje de nubosidad, las capturas no presentan magnitudes de evapotranspiración. Por consiguiente, la plataforma *EEFLUX* dispone de otros productos relevantes para la comprensión del estudio, tales como la capa de nubosidad y la temperatura superficial de la captura, lo que permite distinguir la intensidad de la evapotranspiración dentro de la captura, tal como se aprecia en la siguiente ilustración.



I.- Imagen del mes de Abril, con porcentaje de nubosidad de 1[%], sin presencia de *gaps*.

II.- Imagen del mes de noviembre, con porcentaje de nubosidad de 2[%], con presencia de *gaps*.

III.- Imagen del mes de agosto, con porcentaje de nubosidad de 25[%], con presencia de *gaps*.

Figura 4.15 – Ejemplo de imágenes satelitales, cuenca río Perquiilauquén en San Manuel, plataforma EELFUX.

Capítulo 5

Modelación hidrológica

5.1. Conceptualización del modelo

Corresponde a la elaboración detallada del modelo, en la cual se definen las características esenciales de oferta y demanda de agua, necesarias para realizar la simulación [42]. Dentro de las características de oferta de agua, el modelo requiere la entrada de información meteorológica, tales como precipitación, temperatura, humedad relativa del aire y velocidad del viento, las cuales le permiten simular los procesos del balance hidrológico, a saber, la evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base (Figura 3.5). Representadas por medio de “Unidades hidrológicas” o *Catchment*, es decir, elementos que reproducen la oferta de agua dentro de la delimitación de la cuenca. Dicha delimitación puede ser expresada según las subcuencas adyacentes o las bandas de elevación disponibles en la cuenca [43], representando unidades hidrológicas particulares.

Por consiguiente, las características de demanda de agua son aquellas que permiten complementar al balance hidrológico al representar las componentes de demanda natural o antrópica de la cuenca [42]. Las demandas de agua naturales corresponden a la actividad fenológica del uso de suelo, la cual se expresan por medio de parámetros agronómicos/hidrológicos. Dichos parámetros controlan el proceso de calibración del modelo y simulan la dinámica del suelo de la cuenca, y corresponden al coeficiente de cultivo, la capacidad de la zona de raíces, capacidad de zona profunda, la conductividad hidráulica saturada, el factor de resistencia a la escorrentía y la dirección preferencial del flujo respectivamente. A su vez, las demandas de agua antrópicas se refieren a las extracciones del recurso hídrico sin restitución de aguas¹⁶ para demandas domésticas o económicas, al representar el uso final del recurso en diferentes niveles de actividad y sus tasas de aprovechamiento o uso de agua [44], el cual es esquematizado por medio del elemento “Sitio de Demanda”.

Por lo tanto, la conceptualización del modelo hidrológico para cada cuenca de estudio es la siguiente:

5.1.1. Modelo estero Curipeumo en lo Hernández

Para la modelación hidrológica de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, se considera un total de cuatro unidades hidrológicas para representar su oferta de agua, que corresponden a la delimitación de las subcuencas disponibles dentro de su área de drenaje. Cabe destacar que, debido al tamaño de la cuenca (Figura 4.1) y la distribución gradual de sus elevaciones (Figura 4.4), se escoge representar sus unidades hidrológicas según las subcuencas en lugar de bandas de elevaciones, ya que no presentar una variación de elevaciones significativa (Figura 4.5). A su vez, sus demandas de agua corresponden predominantemente a la actividad agrícola (Figura 4.6), debido a su clasificación de usos de suelo. Por lo que, los derechos de agua concedidos en la cuenca son consuntivos [59]. Así, el esquema de la conceptualización de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández dentro del modelo *WEAP*, es el siguiente:

¹⁶ Derechos de Aprovechamiento.
<https://vriolimari.cl/tipos-de-derechos>

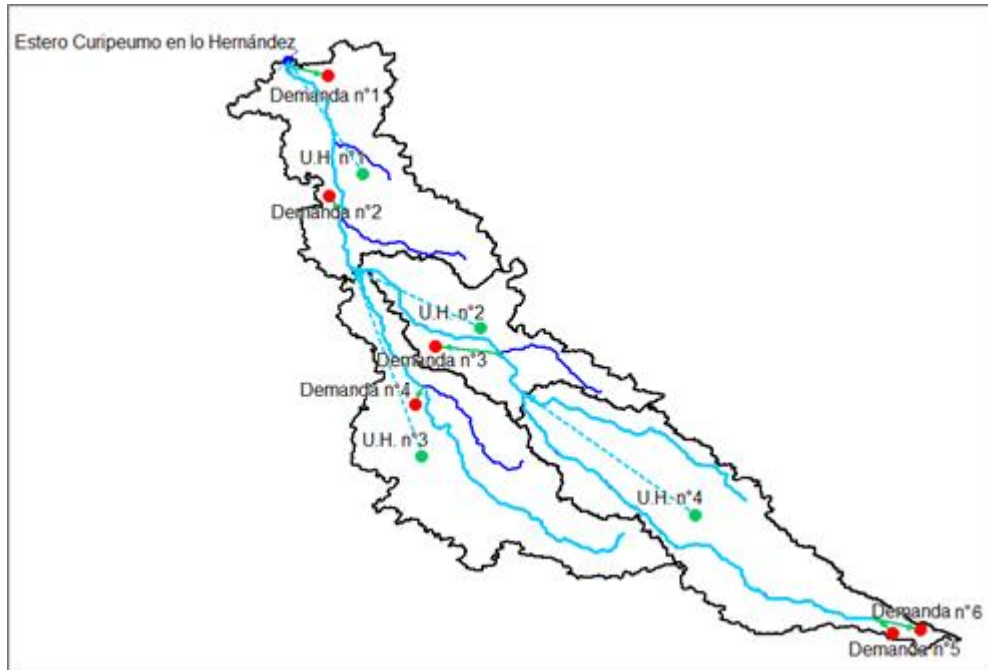


Figura 5.1 – Conceptualización cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, modelo WEAP.

Por consiguiente, el detalle de las características de cada unidad hidrológica y los sitios de demanda establecidos en el modelo, es muestran a continuación:

Tabla 5.1 – Detalle de unidades hidrológicas por subcuencas, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Unidad Hidrológica	Subcuenca [km ²]	Ubicación		Altitud [m.s.n.m]	
		Lat. Sur	Lon. W.		
1	U.H.n°1	50,56	36° 00'	71° 59'	135
2	U.H.n°2	34,003	36° 04'	71° 56'	145
3	U.H.n°3	65,178	36° 07'	71° 57'	150
4	U.H.n°3	67,126	36° 09'	71° 51'	173
Total		216,9			

Fuente: Elaboración propia.

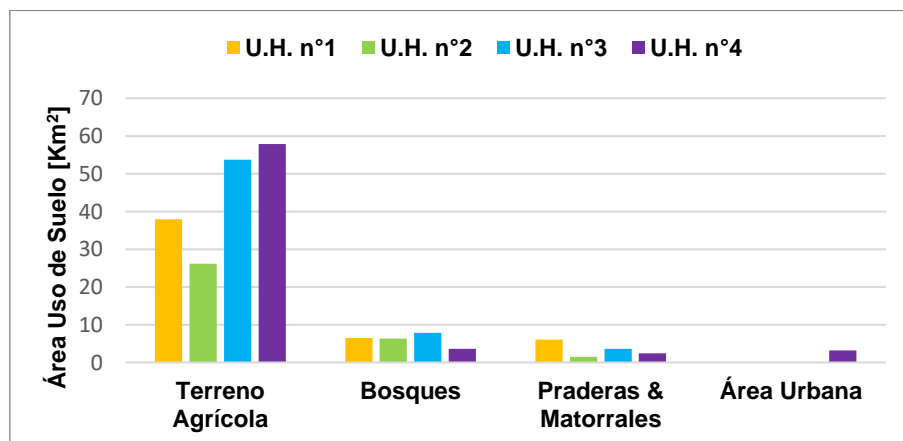


Figura 5.2 – Distribución por usos de suelo, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Tabla 5.2 – Clasificación de uso de suelo, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

	Terreno Agrícola	Bosques	Praderas & Matorrales
U.H.n°1	Arroz	Álamo y Eucalipto	Trébol Subterráneo y Alpiste
U.H.n°2	Arroz	Eucalipto	Trébol Subterráneo y Alpiste
U.H.n°3	Arroz	Eucalipto	Trébol Subterráneo y Alpiste
U.H.n°4	Arroz	Pino Insigne	Trébol Subterráneo y Alpiste

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.3 – Coeficientes de cultivo (Kc), cuenca estero Curipeumo en lo Hernández [3],[67],[68].

	Terreno Agrícola	Bosques	Praderas & Matorrales
U.H.n°1	1,20	0,86 - 1,05	0,75 - 0,90
U.H.n°2	1,20	0,86 - 1	0,75 - 0,90
U.H.n°3	1,20	0,86 - 1	0,75 - 0,90
U.H.n°4	1,15 - 1,20	1	0,75 - 0,90

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4 – Coeficientes de reflexión del cultivo (α), cuenca estero Curipeumo en lo Hernández [69],[70].

	Terreno Agrícola	Bosques	Praderas & Matorrales
U.H.n°1	0,17 – 0,22	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25
U.H.n°2	0,17 – 0,22	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25
U.H.n°3	0,17 – 0,22	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25
U.H.n°4	0,17 – 0,22	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5 – Fracción de Nubosidad, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

	Fracción de Nubosidad Promedio
U.H.n°1	0,12
U.H.n°2	0,12
U.H.n°3	0,12
U.H.n°4	0,12

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6 – Demandas de agua, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

	Caudal Concedido [m3/s]	Asignación Temporal
Demanda n°1	0,323	Eventual
Demanda n°2	1,214	Permanente
Demanda n°3	0,252	Permanente
Demanda n°4	0,067	Permanente
Demanda n°5	0,002	Eventual
Demanda n°6	0,230	Permanente

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Modelo río Perquillauquén en San Manuel

La modelación hidrológica de la cuenca río Perquillauquén en San Manuel, se utilizan las bandas de elevación para establecer sus unidades hidrológicas, debido a que existen cambios bruscos de altitud, tal como se muestra en su gráfica hipsométrica (Figura 4.10). Dichas bandas son trazadas cada 250 [mt] de elevación (Figura 4.11), permitiendo obtener magnitudes de área cercanas por cada banda. Lo que posibilita representar de mejor manera las forzantes meteorológicas que varían su magnitud dependiendo de la altitud, a saber, la precipitación y la temperatura. Con respecto a sus demandas de agua, los derechos otorgados en la cuenca son el tipo consuntivos y no consuntivos [59], de los cuales son utilizados para el sector agrícola (Figura 4.12) y energético respectivamente. Cabe destacar que, se consideran las extracciones de agua de uso consuntivo para realizar el modelo, debido a que la variable de interés para realizar la calibración es el caudal disponible en la cuenca debido a todas las pérdidas asociadas [45]. Por lo tanto, el esquema de la conceptualización de la cuenca río Perquillauquén en San Manuel dentro del modelo *WEAP*, es el siguiente:

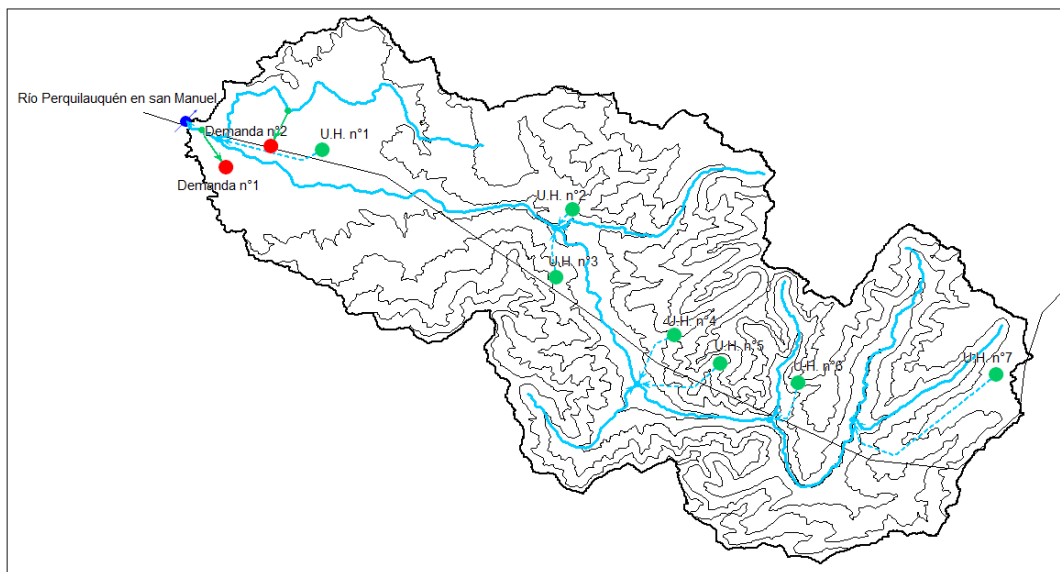


Figura 5.3 – Conceptualización cuenca río Perquillauquén en San Manuel, modelo *WEAP*.

Por consiguiente, el detalle de las características de cada unidad hidrológica y los sitios de demanda establecidos en el modelo, se muestran a continuación:

Tabla 5.7 – Detalle de unidades hidrológicas por subcuencas, cuenca río Perquillauquén en San Manuel.

Unidad Hidrológica	Bandas Elevación		Ubicación		Altitud Media [m.s.n.m]	
	Altitud	Área [km ²]	Lat. Sur	Lon. W.		
1	U.H.n°1	500	81,16	36°26'	71°33'	250
2	U.H.n°2	750	70,88	36°24'	71°26'	625
3	U.H.n°3	1000	64,34	36°26'	71°27'	875
4	U.H.n°4	1250	75,62	36°28'	71°23'	1125
5	U.H.n°5	1500	95,57	36°29'	71°22'	1375
6	U.H.n°6	1750	70,82	36°29'	71°20'	1625
7	U.H.n°7	2230	44,14	36°29'	71°14'	2000
Total			502,5			

Fuente: Elaboración propia.

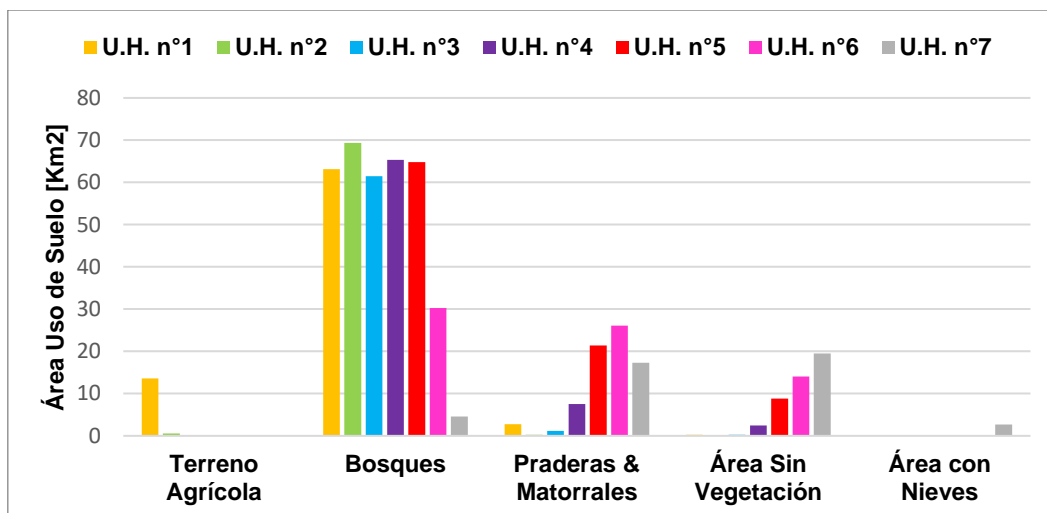


Figura 5.4 – Distribución por usos de suelo, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Tabla 5.8 – Clasificación de uso de suelo, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

	Terreno Agrícola	Bosques	Praderas & Matorrales
U.H.n°1	Trigo Blanco	Pino Insigne	Alfalfa
U.H.n°2	Trigo Blanco	Pino Insigne	Alfalfa - Alpiste - Trébol Subterráneo
U.H.n°3	-	Pino Insigne	Alfalfa - Alpiste - Trébol Subterráneo
U.H.n°4	-	Pino Insigne	Alfalfa - Alpiste - Trébol Subterráneo
U.H.n°5	-	Pino Insigne	Alfalfa - Alpiste - Trébol Subterráneo
U.H.n°6	-	Pino Insigne	Alfalfa - Alpiste - Trébol Subterráneo
U.H.n°7	-	Pino Insigne	Alfalfa

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.9 – Coeficientes de cultivo (Kc), cuenca río Perquilauquén en San Manuel [3],[67],[68].

	Terreno Agrícola	Bosques	Praderas & Matorrales
U.H.n°1	1,15	1	1,05
U.H.n°2	1,15	1	0,95 – 1,05
U.H.n°3	-	1	0,95 – 1,05
U.H.n°4	-	1	0,95 – 1,05
U.H.n°5	-	1	0,95 – 1,05
U.H.n°6	-	1	0,95 – 1,05
U.H.n°7	-	1	1,05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.10 – Coeficientes de reflexión del cultivo (α), cuenca río Perquilauquén en San Manuel [69],[70].

	Terreno Agrícola	Bosques	Praderas & Matorrales	Nieve Fresca
U.H.n°1	0,14 – 0,22	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	-
U.H.n°2	0,14 – 0,22	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	-
U.H.n°3	-	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	-
U.H.n°4	-	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	-
U.H.n°5	-	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	-
U.H.n°6	-	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	0,75 – 0,9
U.H.n°7	-	0,10 – 0,15	0,15 – 0,25	0,75 – 0,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.11 – Fracción de Nubosidad, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

	Fracción de Nubosidad Promedio
U.H.n°1	0,13
U.H.n°2	0,13
U.H.n°3	0,13
U.H.n°4	0,13
U.H.n°5	0,13
U.H.n°6	0,13
U.H.n°7	0,13

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.12 – Demandas de agua, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

	Caudal Concedido [m3/s]	Asignación Temporal
Demanda n°1	6,615	Permanente
Demanda n°2	0,11	Eventual

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6

Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos para cada área de estudio, los cuales corresponden a las estimaciones de la tasa de evapotranspiración según instrumental de monitoreo, expresiones empíricas e imágenes satelitales. Junto con sus respectivas modelaciones hidrológicas, distinguiendo su calibración e indicadores de eficiencia del modelo.

6.1. Resultados cuenca estero Curipeumo en lo Hernández

6.1.1. Instrumental de monitoreo

Corresponden a la estimación de evapotranspiración de referencia derivada de las mediciones de evaporación registradas por los evaporímetros de bandeja disponibles dentro o en las cercanías de la cuenca. Cabe destacar que, los coeficientes de estanques evaporimétricos utilizados presentan una variación estacional y están ajustados al país [71], los cuales son los siguientes:

Tabla 6.1 – Coeficientes estanque evaporímetro (K_p), variación mensual.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
K_p	0,73	0,77	0,81	0,86	0,89	0,83
Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
K_p	0,74	0,68	0,65	0,64	0,66	0,69

Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, los registros de evaporación y las estimaciones de evapotranspiración de referencia, correspondientes a las estaciones meteorológicas que presentan el instrumental evaporimétrico, son las siguientes:

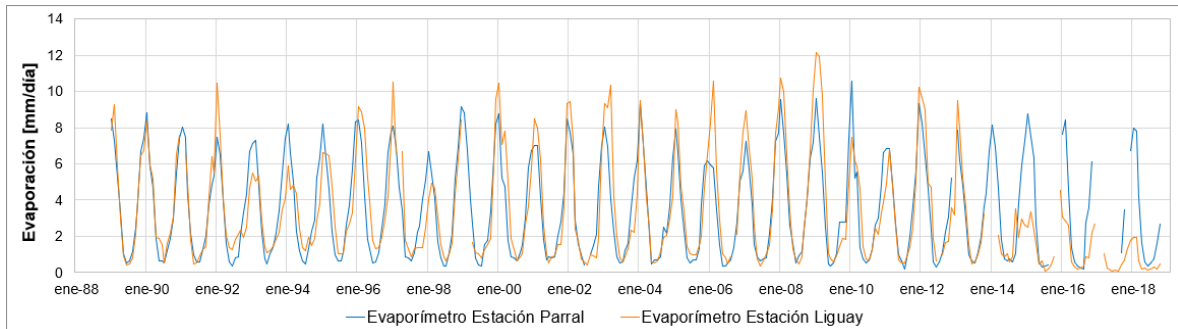


Figura 6.1 – Evaporación por evaporímetros de bandeja, estaciones Parral y Liguay, a escala mensual.

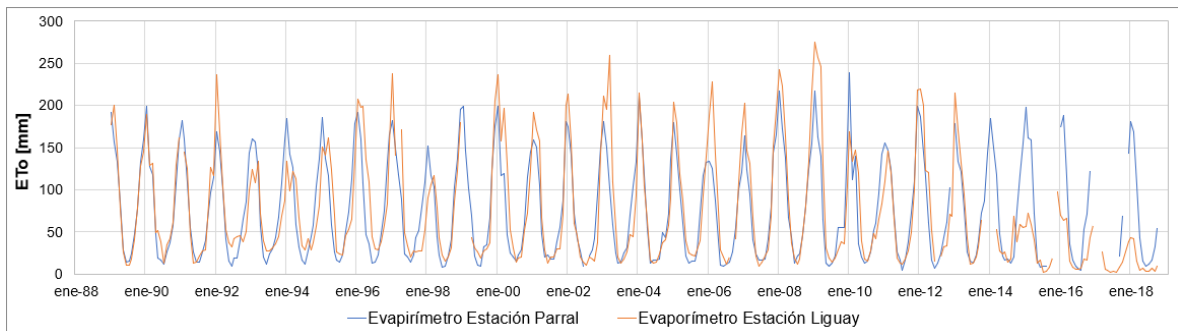


Figura 6.2 – Evapotranspiración de referencia por evaporímetros de bandeja, estaciones Parral y Liguay, a escala mensual.

6.1.2. Expresión empírica

Corresponden a la evapotranspiración de referencia y de cultivo, estimadas por medio de la expresión de Penman y Monteith. Cabe destacar que, los valores de evapotranspiración consideran la estimación de la radiación solar derivada de diferencias térmicas o la ecuación de radiación de *Hargreaves* [3], a saber:

- Radiación solar derivada por diferencias térmicas:

$$R_s = K_{R_s} * \sqrt{(T_{max} - T_{min})} * R_a$$

R_s : Radiación solar entrante [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

K_{R_s} : Coeficiente de Ajuste (0,16 – 0,19)[$^{\circ}C^{-0,5}$]

T_{max} : Temperatura máxima del aire [$^{\circ}C$]

T_{min} : Temperatura mínima del aire [$^{\circ}C$]

R_a : Radiación extraterrestre [$Mj * dia^{-1} * m^{-2}$]

Por lo tanto, la estimación de evapotranspiración de referencia y evapotranspiración de cultivo, considerando un coeficiente de cultivo del arroz como uso de suelo predominante en la cuenca (Figura 5.2),(Tabla 5.3), son las siguientes:

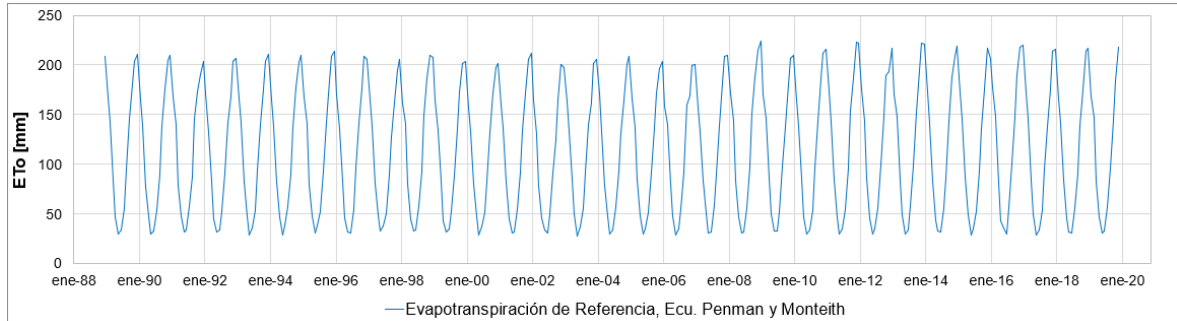


Figura 6.3 – Evapotranspiración de referencia, ecuación de Penman y Monteith, a escala mensual.

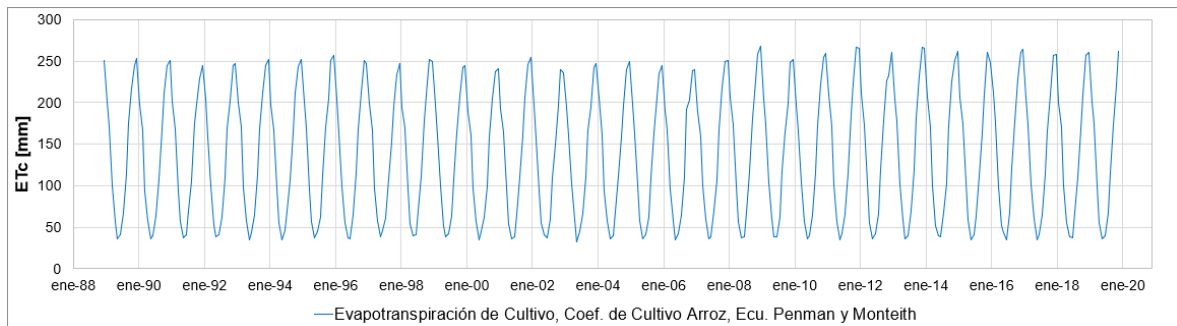


Figura 6.4 – Evapotranspiración de Cultivo, ecuación de Penman y Monteith, a escala mensual.

6.1.3. Imágenes satelitales

Corresponde a los valores de evapotranspiración registrados por teledetección, disponibles por la plataforma EEFLUX. Cabe señalar que, la información mensual de evapotranspiración extraída que las imágenes satelitales, representa el valor promedio correspondiente a cada subcuenca perteneciente al área de estudio. La variación de la evapotranspiración por teledetección, correspondiente a la cueca estero Curipeumo en lo Hernández, es la siguiente:

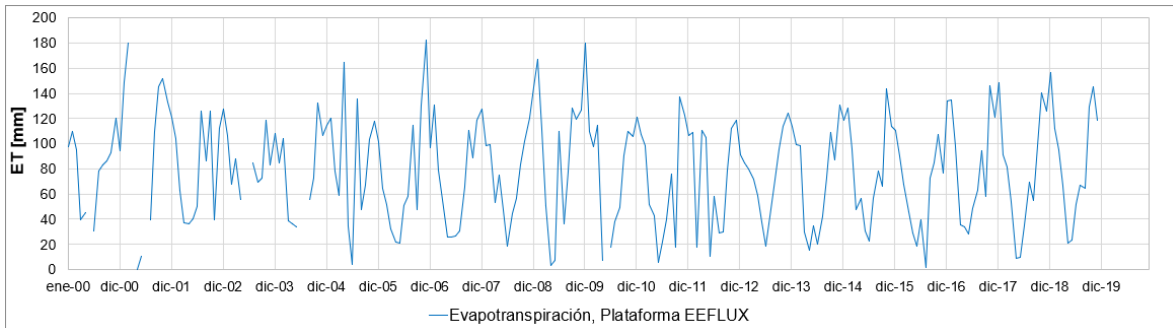


Figura 6.5 – Evapotranspiración por teledetección, plataforma EEFLUX, a escala mensual.

6.1.4. Modelación hidrológica

Corresponde a los resultados obtenidos en el desarrollo de la modelación hidrológica y su respectiva calibración. Dichos resultados consideran la representación del caudal simulado en relación con el caudal observado, respectiva correlación, la idealización de la dinámica del suelo según los parámetros agronómicos/hidrológicos y las pérdidas del modelo que representan el proceso de evapotranspiración. Además, se incluyen los resultados de los indicadores de bondad de ajuste conseguidos por la simulación.

Cabe destacar que, para efectos de este trabajo de título, no se realizara el procedimiento de validación de este modelo, ya que solo se desea obtener los resultados de las tasas de evapotranspiración que provengan de una representación hidrológica de la cuenca de estudio calibrada.

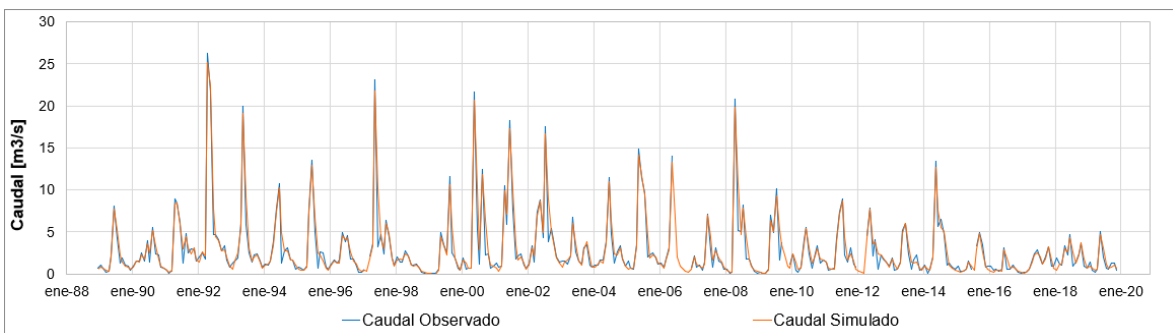


Figura 6.6 –Caudales simulados y observados, serie completa, a escala mensual.

Tabla 6.2 – Indicadores de bondad de ajuste, serie completa.

<i>Nash-Sutcliffe</i>	<i>Nash-Sutcliffe</i> Logarítmico	PBIAS [%]	<i>Kling-Gupta</i>
0,938	0,843	5,147	0,939

Fuente: Elaboración propia.

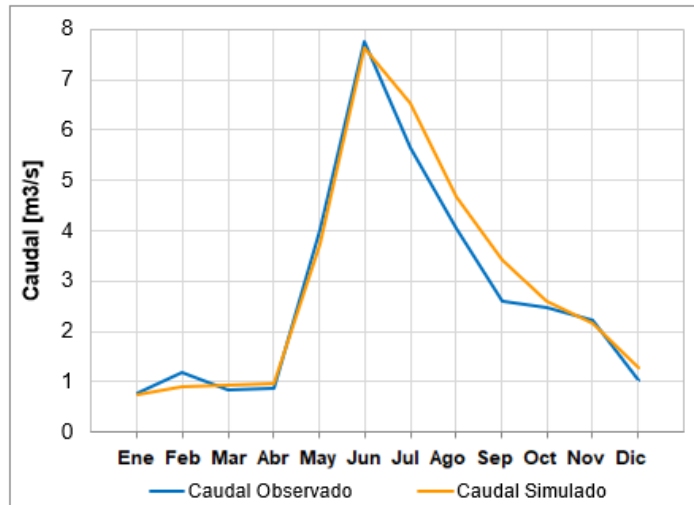


Figura 6.7 – Caudales simulados y observados, serie mensual promedio.

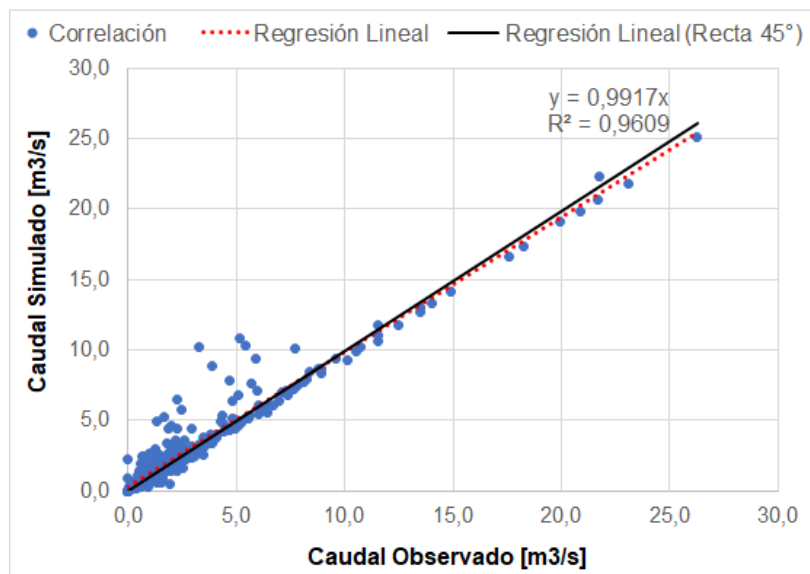


Figura 6.8 – Correlación entre caudal observado y caudal simulado.

Tabla 6.3 – Parámetros agronómicos\hidrológicos de modelación.

P \ US **	U. H. n°1 *				U. H. n°2			
	AGR***	BOS	PM	U	AGR	BOS	PM	U
SW	425	425	425	425	415	415	415	415
DW	1225				1215			
RRF	10,2	10,2	10,2	10,2	9,98	9,98	9,98	9,98
KS	6700	6700	6700	6700	6700	6700	6700	6700
KD	6950				6950			
F	0,548	0,548	0,548	0,548	0,545	0,545	0,545	0,545
Z1	5,0				5,0			
Z2	3,0				3,0			

P \ US **	U. H. n°3				U. H. n°4			
	AGR	BOS	PM	U	AGR	BOS	PM	U
SW	412	412	412	412	405	405	405	405
DW	1095				1090			
RRF	9,96	9,96	9,96	9,96	9,85	9,85	9,85	9,85
KS	6700	6700	6700	6700	6700	6700	6700	6700
KD	6980				6980			
F	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53
Z1	5,0				5,0			
Z2	3,0				3,0			

*U.H. : Unidad hidrológica

** PUS : Parámetros \ Uso de suelo

*** AGR, BOS, PM, U : Agrícola, Bosques, Pradera-Matorral, Urbano.

Fuente: Elaboración propia.

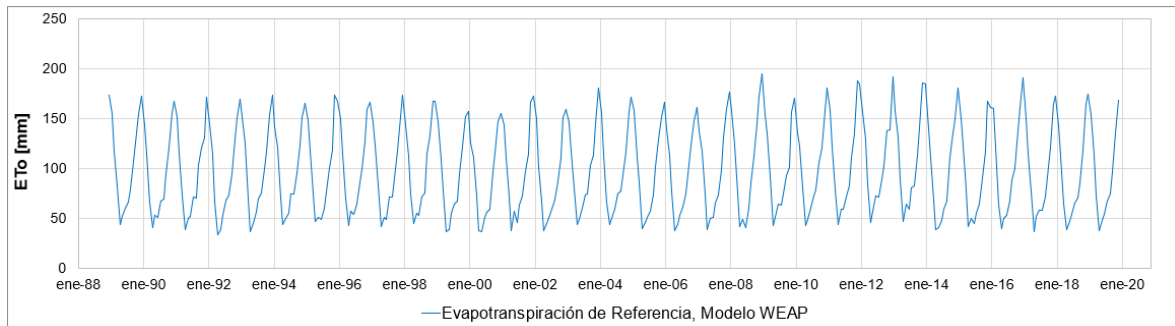


Figura 6.9 – Evapotranspiración de referencia, modelación hidrológica, a escala mensual.

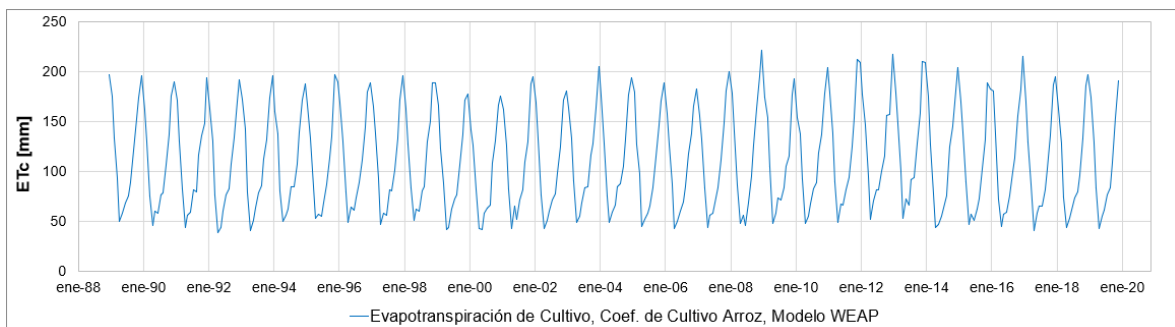


Figura 6.10 – Evapotranspiración de cultivo, modelación hidrológica, a escala mensual.

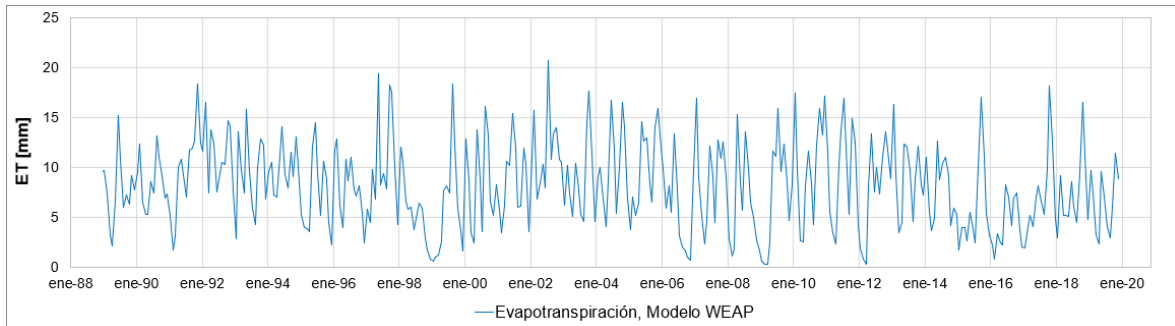


Figura 6.11 – Evapotranspiración, modelación hidrológica, a escala mensual.

6.2. Resultados cuenca río Perquilauquén en San Manuel

6.2.1. Instrumental de monitoreo

Corresponden a la estimación de evapotranspiración de referencia derivada de las mediciones de evaporación registradas por los evaporímetros de bandeja disponibles dentro o en las cercanías de la cuenca. De acuerdo con los coeficientes de estanque evaporimétricos (Tabla 6.1) disponibles de manera mensual, la estimación de la evapotranspiración de referencia, así como sus registros de evaporación por medio del evaporímetro de bandeja serán los siguientes:

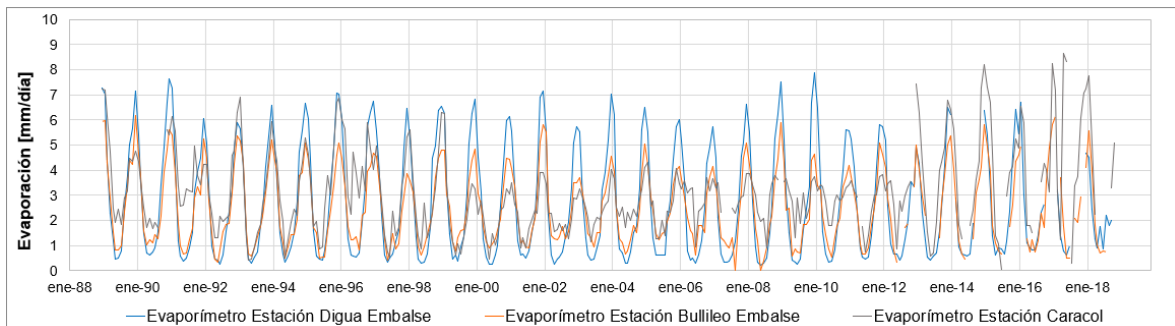


Figura 6.12 – Evaporación por evaporímetros de bandeja, estaciones Digua Embalse, Bullileo Embalse y Caracol, a escala mensual.

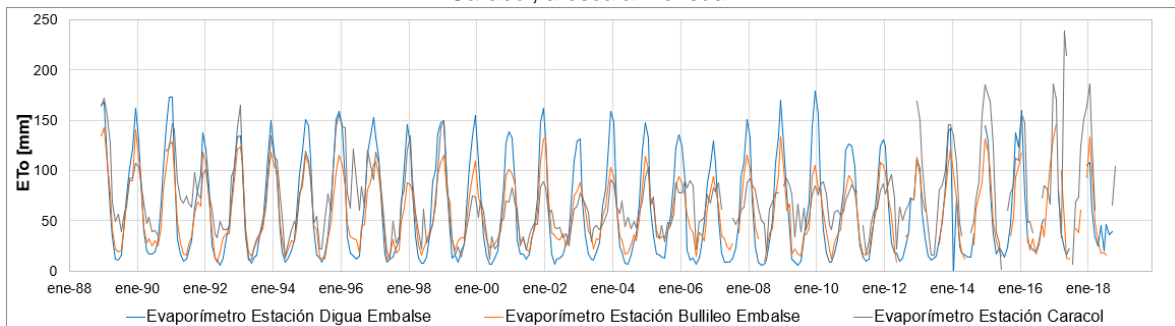


Figura 6.13 – Evapotranspiración de referencia, estaciones Digua Embalse, Bullileo Embalse y Caracol, a escala mensual.

6.2.2. Expresión empírica

Corresponden a la evapotranspiración de referencia y de cultivo, estimadas por medio de la expresión de Penman y Monteith. Cabe señalar que, los valores de evapotranspiración consideran la estimación de la radiación solar derivada de diferencias térmicas o la ecuación de radiación de Hargreaves [3]. Por lo cual, la estimación de evapotranspiración de referencia y evapotranspiración de cultivo, considerando como coeficiente de cultivo el correspondiente a coníferas como uso de suelo predominante en la cuenca (Figura 5.4),(Tabla 5.9), son las siguientes:

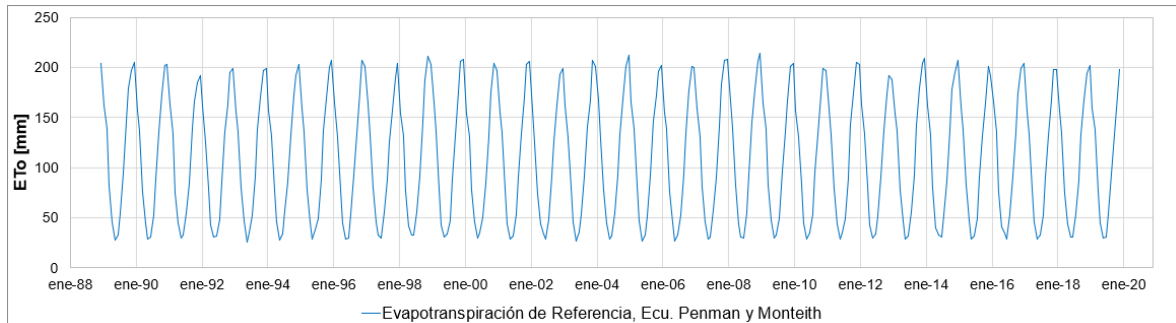


Figura 6.14 – Evapotranspiración de referencia, ecuación de Penman y Monteith, a escala mensual .

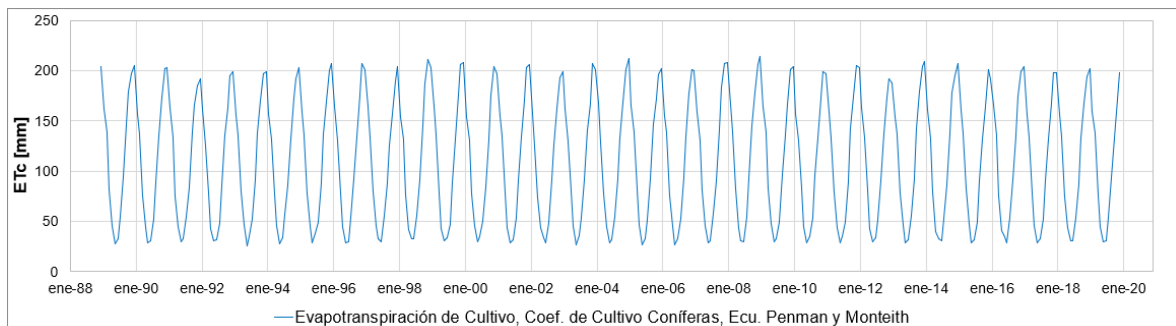


Figura 6.15 – Evapotranspiración de Cultivo, ecuación de Penman y Monteith, a escala mensual.

6.2.3. Imágenes satelitales

Corresponde a los valores de evapotranspiración registrados por teledetección, disponibles por la plataforma EEFLUX. Cabe señalar que, la información mensual de evapotranspiración extraída que las imágenes satelitales, representa el valor promedio correspondiente al área de cada banda de elevación presente dentro de la cuenca de estudio. La variación de la evapotranspiración por teledetección correspondiente a la cuenca río Perquillauquén en San Manuel, es la siguiente:

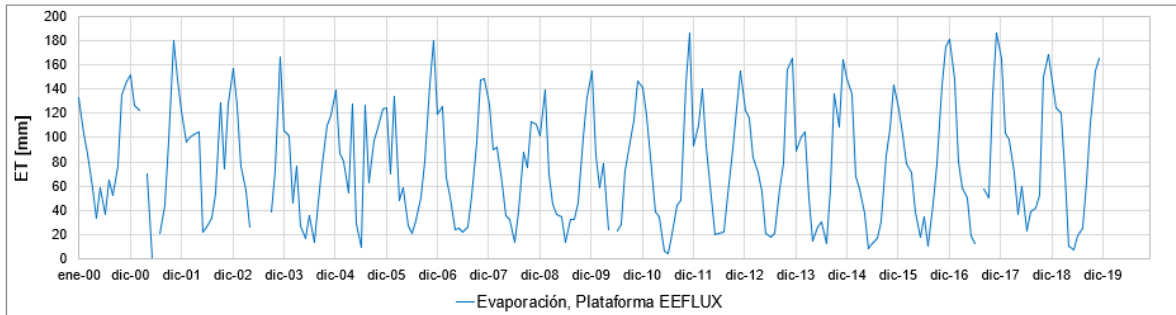


Figura 6.16 – Evapotranspiración por teledetección, plataforma EEFLUX, a escala mensual.

6.2.4. Modelación hidrológica

Corresponde a los resultados obtenidos en el desarrollo de la modelación hidrológica y su respectiva calibración. Dichos resultados consideran la representación del caudal simulado en relación con el caudal observado, respectiva correlación, la idealización de la dinámica del suelo según los parámetros agronómicos/hidrológicos y las pérdidas del modelo que representan el proceso de evapotranspiración. Además, se incluyen los resultados de los indicadores de bondad de ajuste conseguidos por la simulación.

Cabe destacar que, para efectos de este trabajo de título, no se realizara el procedimiento de validación de este modelo, ya que solo se desea obtener los resultados de las tasas de evapotranspiración que provengan de una representación hidrológica de la cuenca de estudio calibrada.

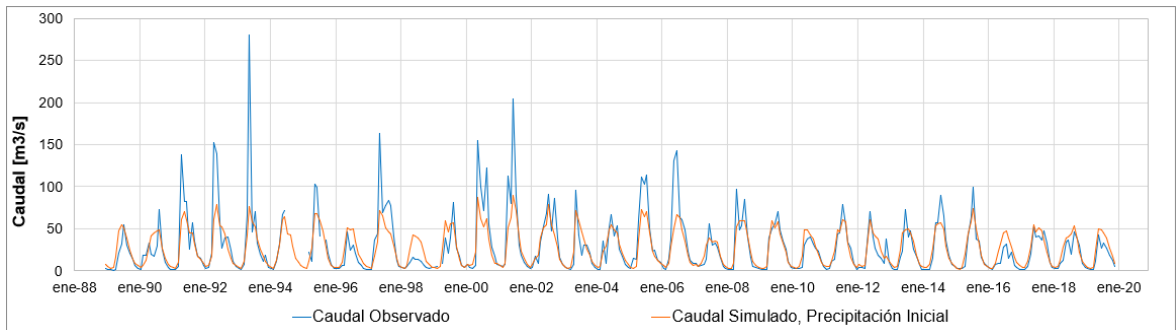


Figura 6.17 –Caudales simulados y observados, serie completa, a escala mensual.

Tabla 6.4 – Indicadores de bondad de ajuste, serie completa.

Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	PBIAS [%]	Kling-Gupta
0,646	0,983	-6,965	0,581

Fuente: Elaboración propia.

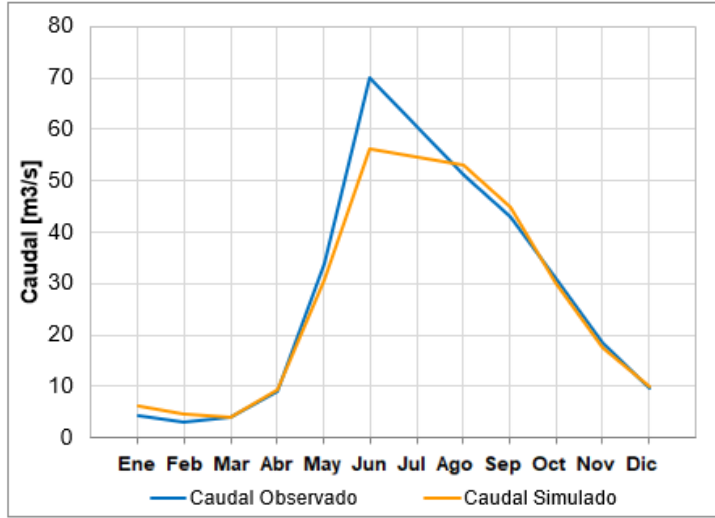


Figura 6.18 – Caudales simulados y observados, serie mensual promedio.

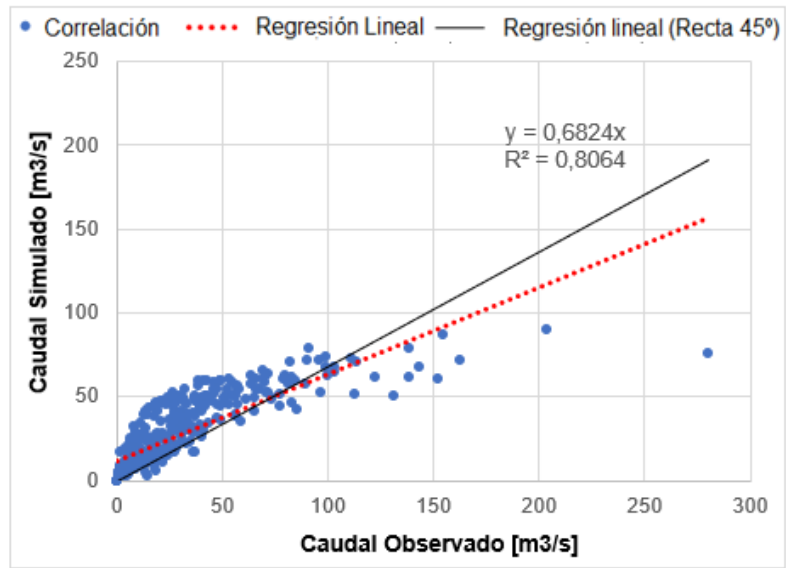


Figura 6.19 – Correlación entre caudal observado y caudal simulado.

Tabla 6.5 – Parámetros agronómicos\hidrológicos de modelación.

	U.H. nº1 *	U.H. nº2	U.H. nº3	U.H. nº4	U.H. nº5	U.H. nº6	U.H. nº7
P \ US**	AGR-BOS***	BOS	BOS	BOS	BOS	BOS-PM	PM-SV
SW	1450	1250	1250	1250	1250	1125	1000
RRF	0,15	0,15	0,15	3	3	6	6
KS	38000	38000	38000	25000	12500	6000	6000
F	0,12	0,12	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15
DW	850	850	850	850	850	850	850
KD	28000	28000	28000	25000	25000	16000	12000
Z1	8	8	8	8	8	8	8
Z2	2	2	2	2	2	2	2
PC	-12	-12	-12	-12	-11	-9,5	-5,5
PF	0	0	0	0	0,15	0,35	1,5

*U.H. : Unidad hidrológica.

** PUS : Parámetros \ Uso de suelo

*** AGR, BOS, PM, U : Agrícola, Bosques, Pradera-Matorral, Sin vegetación.

Fuente: Elaboración propia.

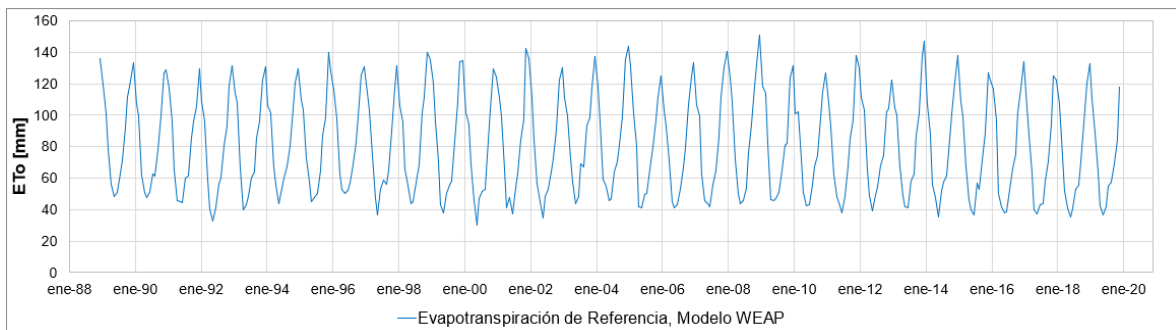


Figura 6.20 – Evapotranspiración de referencia, modelación hidrológica, a escala mensual.

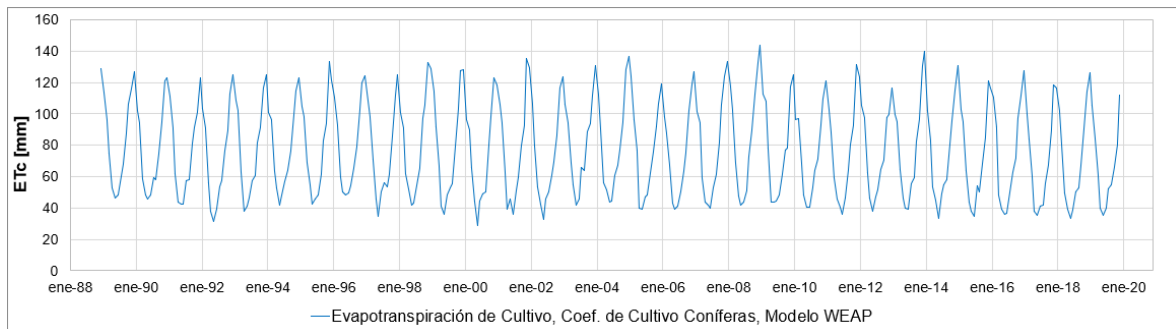


Figura 6.21 – Evapotranspiración de cultivo, modelación hidrológica, a escala mensual.

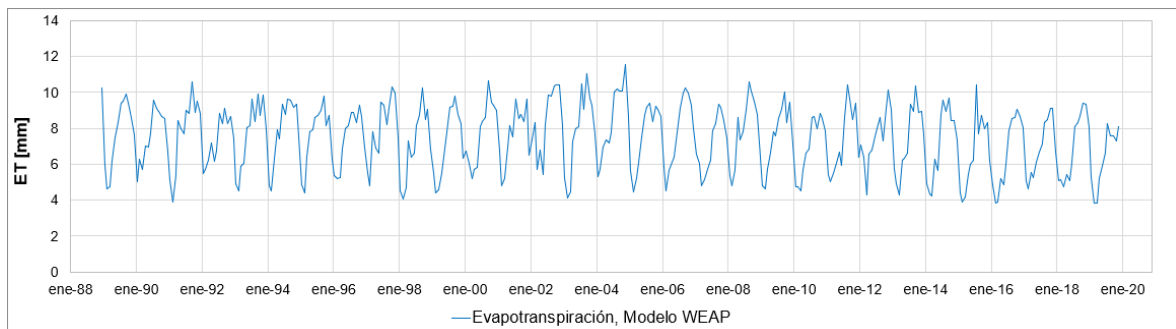


Figura 6.22 – Evapotranspiración, modelación hidrológica, a escala mensual.

Capítulo 7

Análisis de resultados

El presente capítulo corresponde al estudio y evaluación de la evapotranspiración por teledetección procedente de la plataforma *EEFLUX*, con los resultados obtenidos por cada alternativa disponible para estimar la tasa de evapotranspiración, a saber, por instrumental de monitoreo, por expresión empírica y por modelación hidrológica. El cual consiste en analizar la magnitud y temporalidad del proceso según corresponda la condición en la cual se halla conseguido, a saber, para superficies de vegetación continua sin restricciones hídricas y para superficies con cultivos específicos en situaciones óptimas de suelo y agua. Cabe destacar que, el propósito por el cual se decide evaluar la efectividad de la información registrada por percepción remota con las estimaciones de evapotranspiración es debido a que, ellas permiten determinar la disponibilidad de agua en una superficie de cultivo y el recurso hídrico de una cuenca [72].

7.1. Instrumental de monitoreo

De acuerdo con los resultados de evaporación obtenidos por los evaporímetros de bandeja disponibles para cada cuenca, tal como se muestran en las Figuras 6.1 y 6.12. Se aprecia que, las magnitudes *peak* del proceso de evaporación rondan entre 8 a 10 [mm/día] para el caso de la cuenca del estero Curipeumo en lo Hernández y entre 6 a 8 [mm/día] para el caso de la cuenca de río Perquilauquén en San Manuel.

Y a su vez, los valores valle se encuentran entre 1 a 0 [mm/día] y entre 1 a 0,5 [mm/día] respectivamente. Ahora bien, con respecto a la gráfica de evaporación disponible por las estaciones de Parral y Liguay pertenecientes la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández (Figura 6.1), se aprecia que se mantiene una temporalidad y continuidad desde el inicio de periodo de estudio. Sin embargo, la magnitud de los registros de evaporación provenientes del evaporímetro de la estación de Liguay decrece en los años finales, a diferencia de la curva de la estación de Parral. Por consiguiente, para el caso de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel (Figura 6.12), las gráficas del proceso de evaporación pertenecientes a los evaporímetros de las estaciones Digua embalse y Bullileo embalse, presentan una temporalidad semejante en sus observaciones registradas a diferencia de las mediciones realizadas por el evaporímetro de la estación Caracol; la cual es discontinua y difiere del resto en su magnitud debido a no disponer de la cantidad de agua suficiente para realizar el proceso, en contraste con la capacidad de evaporación que sucede dentro de un embalse. Además, para las tres curvas de la gráfica se aprecia que sus registros de evaporación al término del periodo de estudio presentan discontinuidad. De lo mencionado anteriormente, se distingue que las magnitudes *peak* de evaporación de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández superan a las registradas para la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, pero sus valores valle tienen a ser semejantes. Esta diferencia es debido a que los valores de evaporación están asociados a una cuenca de uso de suelo agrícola (Figura 4.6), por lo que el proceso se ve influenciado por el efecto de los factores microclimáticos generados por la superficie de cultivo [73]. Esto quiere decir que a pesar de que los evaporímetros de bandeja se encuentren ubicados a una altitud inferior (Tabla 4.1) que los pertenecientes a la cuenca de uso de suelo forestal (Figura 4.12),(Tabla 4.3), el efecto advectivo en alturas inferiores influencia la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento, variables climáticas que intervienen en la evaporación [74]. Por lo tanto, debido a que presentan curvas de evaporación constantes y continuas dentro de la mayor parte del periodo de estudio, se escoge la evaporación de la estación de Parral para la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández y de la estación de Digua embalse para la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, para representar las tasas de evaporación pertenecientes al instrumental de monitoreo.

7.2. Expresión empírica

Con respecto a los resultados provenientes de la ecuación de *Penman y Monteith*, expresados en las Figuras 6.3 y 6.14, las magnitudes que presentan las gráficas de evapotranspiración de referencia de ambas cuencas son semejantes, ya que presentan valores *peak* y valle dentro de la misma magnitud a lo largo del periodo de estudio, a saber, de 200 [mm] y 25 [mm] respectivamente. Esto se debe a que ambas cuencas tienen la presencia del mismo tipo de clima templado frío y templado cálido junto a lluvias invernales [55],[56], por lo que indica que las variaciones meteorológicas que intervienen en la expresión empírica, tales como la temperatura o la velocidad del viento no sufre variaciones drásticas a pesar de las diferencias de elevación que tienen ambas cuencas (Figura 4.5),(Figura 4.11). Sin embargo, producto de la diferencia de uso de suelo que poseen cada una de ellas, los valores de evapotranspiración de cultivo difieren, ya que poseen distintas actividades fenológicas.

La diferencia radica en la magnitud del coeficiente de cultivo que pondera a la “ET_o”, ya que para el caso de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández se utiliza el valor correspondiente al uso de suelo dominante en toda la superficie de la cuenca, a saber, el arroz (Tabla 5.2),[49]. El cual es superior al coeficiente de cultivo representativo al uso de suelo forestal, específicamente la especie de conífera de pino insignie (Tabla 5.8) de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel [61].

Ahora bien, la razón por la cual dichos valores de “K_c” difieren es debido a que, para el caso del uso de suelo forestal, las coníferas presentan hojas o estructuras vegetativas con poco espacio entre ellas, lo que reduce su resistencia aerodinámica [3] y genera una emisividad térmica nula [75].

Al contrario, el “K_c” correspondiente al arroz, al plantarse en condiciones en la cual se desarrolla sobre una lámina de agua o de manera inundada [3], presenta una alta emisividad térmica sobre todo en meses estivales [75]. Por lo tanto, se dispone de diferentes evapotranspiraciones de cultivo representativas para cada uso de suelo en las cuencas de estudio, según la alternativa de estimación por expresión empírica.

7.3. Modelación hidrológica

Corresponde a la alternativa de estimación que representa las tasas de evaporación provenientes de la modelación hidrológica por medio de la metodología que reproduce la dinámica del suelo [42], las cuales son expresadas en las Figuras 6.9 a 6.11 para el caso de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández y las Figuras 6.20 a 6.22 para la cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Referente a la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, su modelación hidrológica posee una representación gráfica ajustada con la serie del caudal observado, tal como se muestra en la Figura 6.6. Dado que la efectividad de la calibración del modelo es validada no solo visualmente, sino que también por sus indicadores de bondad de ajuste y su gráfica de dispersión. Según la Tabla 6.2, los indicadores de bondad de ajuste pertenecientes a las eficiencias de *Nash-Sutcliffe*, *Nash-Sutcliffe* logarítmico y de *Kling-Gupta*, presentan magnitudes cercanas al valor unitario, a saber, de 0,938; 0,843 y 0,939. Indicando así, que los caudales simulados del modelo poseen un rendimiento aceptable según las eficiencias de *Nash-Sutcliffe* [46] y que dicho modelo tiene a un ajuste ideal según la eficiencia de *Kling-Gupta* [48]. Por su parte, el valor PBIAS de 5,147 [%], es porcentaje positivo y menor al 10 [%], el cual representa una subestimación del modelo [76], pero con una clasificación de rendimiento de “Muy Bueno” según [46]. Además, tal como se muestra en la Figura 6.8, su gráfica de dispersión considerando la condición ideal de una recta de intercepto nulo, entrega un coeficiente de determinación de 0,9606, el cual refleja un 96 [%] de confiabilidad del caudal simulado con los valores observados [63].

Entonces, según las Figuras 6.9 a 6.11, la evapotranspiración de referencia se encuentra entre magnitudes de 175 [mm] y de 48 [mm] aproximadamente. A su vez, la “ETc” al considerar los coeficientes de cultivo indicados en la Tabla 5.3, presenta valores *peak* y valles de 200 [mm] y de 50 [mm] respectivamente. También, en ambas tasas de evapotranspiración se aprecia una clara continuidad y temporalidad, reflejando los meses con mayor y menor demanda hídrica. Por consiguiente, su gráfica de evapotranspiración presenta una temporalidad irregular, lo que refleja la influencia de la capacidad del suelo de retener y aportar agua, al utilizar un modelo que conceptualiza el impacto del uso y el tipo de suelo en los procesos hidrológicos [44].

Por lo tanto, los resultados de tasas de evapotranspiración provenientes de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández permiten representar de manera aceptable las pérdidas del recurso hídrico bajo condiciones de demanda agrícola, ya que la modelación hidrológica de esta cuenca permite reproducir la dinámica del suelo por medio de sus parámetros agronómicos/hidrológicos (Tabla 6.3).

Así pues, en relación con la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, está presenta una particularidad, la cual se evidencia en la Figura 6.17 y en la Tabla 6.4. En ellas se aprecia un desajuste con los caudales observados y valores de eficiencia que indican un proceso de calibración que no ofrece una confiabilidad en sus resultados. Por lo tanto, el análisis del problema y su propuesta de solución que permita subsanar la deficiencia en la modelación de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel y obtener resultados de tasas de evapotranspiración con mayor confiabilidad se muestra a continuación.

7.3.1. Análisis del problema

Dentro de la serie de caudales en la modelación hidrológica de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel de la Figura 6.17, se visualiza que el caudal simulado no logra ajustarse al caudal observado proveniente de su estación fluviométrica, precisamente en ciertos años en los cuales la simulación no logra reproducir la magnitud de los eventos *peak* dentro del periodo de estudio. Esos periodos en los cuales no se logra alcanzar los caudales observados *peak*, son dentro de los meses de mayo, junio o julio en los años 1991,1992,1993,1995,1997,2000,2001,2005 y 2006 precisamente.

Por ende, la variación porcentual que existe entre la diferencia de caudales se encuentra entre un 38 [%] a un 73 [%] de disparidad, tal como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 7.1 – Variación porcentual entre caudales, modelación hidrológica inicial, río Perquilauquén en San Manuel.

Periodo	Caudal Observado [m ³ /s]	Caudal Simulado [m ³ /s]	Variación [%]
may-91	138,32	60,91	56%
may-92	151,97	60,64	60%
jun-93	280,01	76,08	73%
jun-95	103,40	67,53	35%
jun-97	163,03	71,81	56%
jun-00	154,41	87,17	44%
jul-01	203,76	89,64	56%
jul-05	113,25	70,38	38%
jul-06	143,36	67,32	53%

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, debido a que la precipitación es el proceso por el cual se genera el caudal simulado en la modelación hidrológica, su distribución espacial dentro de la cuenca o gradiente de precipitación (Tabla 4.5), debe ser representativo de la zona de análisis, (en cualquier dirección y escala espacial que se requiera), permitiendo así que el ajuste del resultado del modelo sea de calidad [77].

Por lo tanto, se infiere que dicha variable meteorológica no satisface la caracterización topográfica de la cuenca, expresada en sus bandas de elevación (Figura 4.11). Por esta razón, al visualizar la Figura 4.14, se aprecia que la cuenca no dispone de estaciones meteorológicas que reproduzcan la precipitación dentro de las bandas de elevación superiores a los 750 [m.s.n.m.] (Tabla 5.7). Entonces, la ausencia de estaciones de monitoreo que reproduzcan de mejor manera la variación de precipitación en diferentes elevaciones (Tabla 4.3) dentro de la cuenca podría representar el problema del desajuste con los caudales observados *peak*, debido que implicaría un grado de incertidumbre en los datos climáticos de entrada al modelo hidrológico. Ya que, según [78], la precipitación sobre terrenos complejos como cuencas montañosas es variable, debido a que sus estaciones de medición no son suficientes para obtener una representación válida del proceso. Cabe señalar que, de manera análoga la gráfica de los caudales mensuales promedios también presenta una subestimación de los caudales observados entre los meses de mayo a junio, tal como se muestra en la Figura 6.18.

Por su parte, los indicadores de que se aprecian en la Tabla 6.4, se identifica una clara disparidad en las magnitudes de las eficiencias de *Nash-Sutcliffe* y *Nash-Sutcliffe* logarítmico, a saber, de 0,646 y 0,983 respectivamente. Esta diferencia es debido a que el indicador de *Nash-Sutcliffe* subestima los errores y eficiencia de los caudales bajos del modelo, ya que tiende a estar dominado por errores en los caudales altos. Por el contrario, el indicador *Nash-Sutcliffe* logarítmico, al acercarse al valor unitario, refleja que reduce la sensibilidad de la métrica de los caudales altos y a su vez aumenta la de los caudales bajos¹⁷. A su vez, el indicador PBIAS arroja un valor de -6,965 [%], lo que representa que existe un sesgo de sobrestimación del modelo [76], y por su parte el indicador *Kling-Gupta* posee una magnitud de 0,581 que, al ser bastante inferior al valor unitario, no logra representar un ajuste ideal [48].

Dicho esto, sus indicadores reflejan que a pesar de que los valores de caudal simulado dentro del periodo de estudio se tienden a ajustar o a superar a los valores del caudal observado (caudales medios o bajos), la precipitación utilizada no logra representar los eventos *peak*, los cuales son puntuales en comparación a la serie completa. Por esta razón su indicador PBIAS es negativo, ya que existe un mayor número de caudales simulados que superan el caudal observado, considerando valores promedios dentro del periodo de estudio. Además, sus eficiencias de *Nash-Sutcliffe* demuestran que a pesar de que los caudales observados *peak* sean eventos puntuales, estos tienden a dominar la estadística del modelo, ya que su expresión logarítmica compensa la subvaloración de los caudales medios-bajos simulados. Al igual que, lo evidencia la eficiencia de *Kling-Gupta*, debido a que su magnitud evidencia un modelo “no ideal” al no ajustarse a los valores observados.

Por lo tanto, el gradiente de precipitación utilizado para desarrollar la modelación hidrológica de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel (Tabla 4.5), no satisface al caudal observado dentro de la calibración del modelo, evidenciando así el problema que existe en esta cuenca precordillerana [61]. Por esta razón, se propone como solución el modificar los registros de precipitación, esperando así subsanar esta eventualidad.

¹⁷ *Bivariate Statistics SRG, eWater Community Wiki.*

<https://wiki.ewater.org.au/display/SD45/Bivariate+Statistics+SRG#BivariateStatisticsSRG-NSEofLogData>

7.3.2. Solución del problema

La propuesta para solucionar el problema del desajuste del caudal simulado con los valores observados es modificar los registros de precipitación ingresados al modelo, correspondientes a las elevaciones en las cuales la ausencia de estaciones meteorológicas afecte la información meteorológica. Dicha modificación al proceso de precipitación consiste en un análisis de sensibilidad del proceso de precipitación al aumentar porcentualmente la magnitud de los registros asociados a las bandas de elevación superiores a los 750 [m.s.n.m.], debido a que la altitud de las estaciones disponibles no supera dicha magnitud (Tabla 4.3). La variación porcentual que sufrirá la precipitación será evaluada con incrementos de un 5 [%], 7,5 [%] y un 10 [%].

Cabe destacar que, la modificación de la precipitación requiere ser verificada según la variación de almacenamiento que sufre la cuenca producto de la alteración del proceso, evitando así un exceso o sobredimensionamiento del recurso hídrico sobre la cuenca. Su verificación será por medio de la ecuación general del balance hídrico, la cual permite identificar la variación del contenido de agua [79] y se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta S = P - ET - Q^*$$

ΔS : Variación de almacenamiento de la cuenca.

P : Precipitación.

ET : Pérdidas Evapotranspirativas.

Q^* : Caudal de Escorrentia Superficial de salida de la cuenca.

Por consiguiente, ya realizada la modificación de la precipitación en un 10 [%], la evaluación de su comportamiento sobre la cuenca se expresa según el balance hídrico a nivel anual, tal como se muestra en la siguiente Figura:

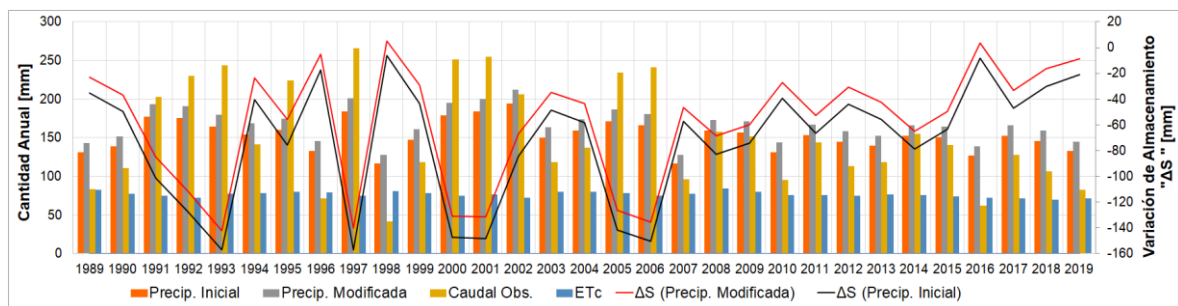


Figura 7.1 – Balance hídrico anual, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala anual.

De acuerdo con la Figura 7.1, se aprecia que en la cuenca río Perquilauquén en San Manuel considerando la condición de precipitación inalterada, existe un evidente estado de déficit hídrico, debido a las magnitudes negativas de almacenamiento. Cabe señalar que, la pérdida evapotranspirativa utilizada en el balance hídrico es la pérdida de agua provenientes de una superficie de cultivo específico en situaciones óptimas de suelo y agua, ósea, la evapotranspiración de cultivo sobre terrenos forestales.

Ahora bien, según la variación de almacenamiento en condición de precipitación modificada en un 10 [%], se distingue que el proceso no ofrece un sobredimensionamiento del recurso hídrico, porque a pesar de tener magnitudes superiores a la condición inicial, aun la cuenca continua en un estado de estrés hídrico. Ya que, no existen periodos de tiempo en los que hallan valores positivos

de almacenamiento, inclusive si en ese mismo año la precipitación supera al caudal observado por la estación fluviométrica.

Por lo tanto, producto de que la precipitación modificada no se encuentra sobredimensionada, se dispone a utilizar este registro de precipitación para desarrollar la recalibración del modelo hidrológico y obtener las tasas de evapotranspiración con mayor confiabilidad.

La recalibración del modelo hidrológico para la cuenca río Perquilauquén en San Manuel considerando una precipitación modificada en un 10 [%], se muestra a continuación:

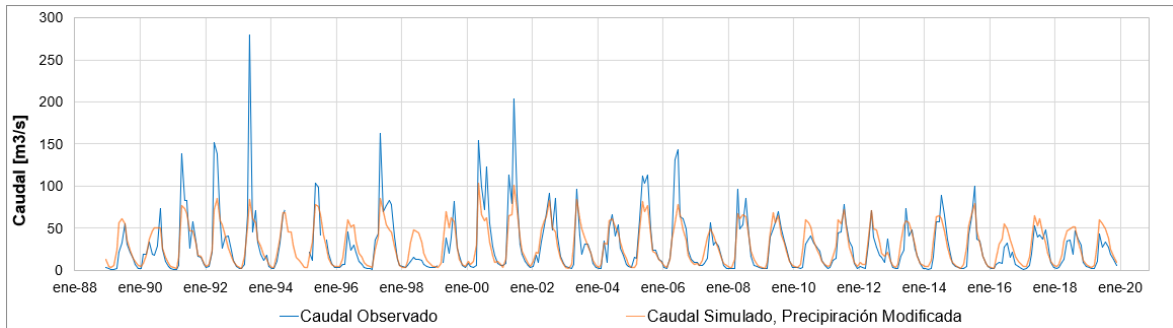


Figura 7.2 –Caudales simulados y observados, precipitación modificada, serie completa, a escala mensual.

Tabla 7.2 – Indicadores de bondad de ajuste, precipitación modificada, serie completa.

<i>Nash-Sutcliffe</i>	<i>Nash-Sutcliffe</i> Logarítmico	PBIAS [%]	<i>Kling-Gupta</i>
0,679	0,978	-4,465	0,658

Fuente: Elaboración propia.

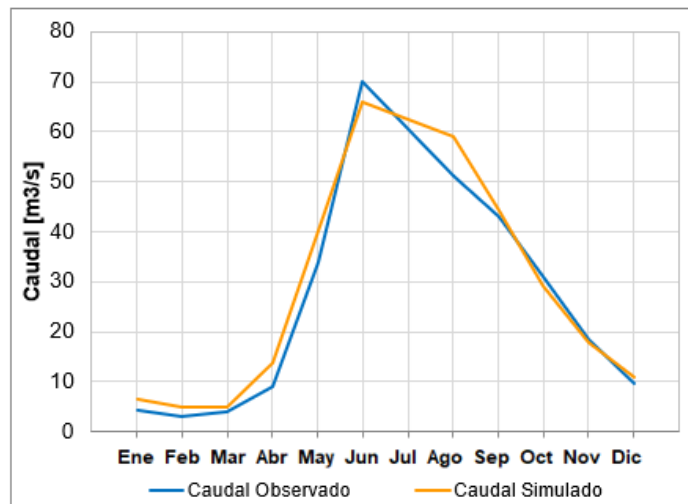


Figura 7.3 – Caudales simulados y observados, precipitación modificada, serie mensual promedio.

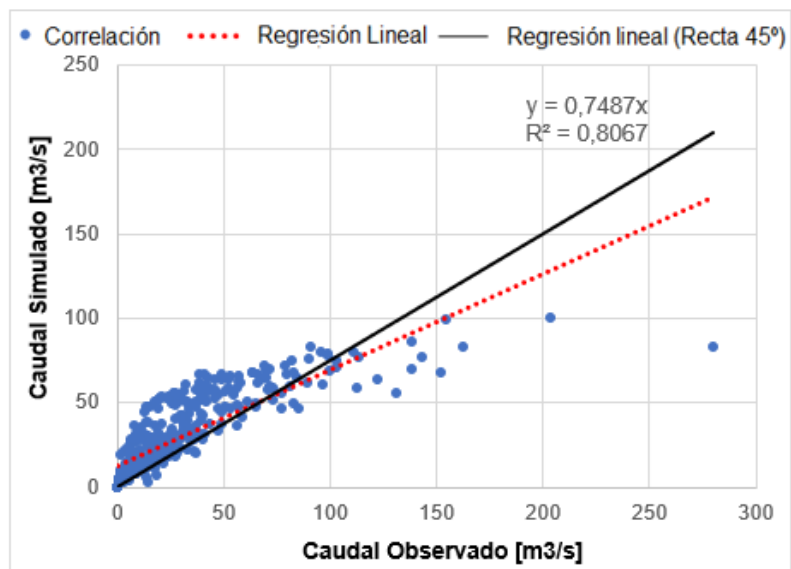


Figura 7.4 – Correlación entre Caudal Observado y caudal simulado.

Tabla 7.3 – Parámetros agronómicos/hidrológicos de modelación, precipitación modificada.

	U.H. n°1 *	U.H. n°2	U.H. n°3	U.H. n°4	U.H. n°5	U.H. n°6	U.H. n°7
P \ US**	AGR-BOS***	BOS	BOS	BOS	BOS	BOS-PM	PM-SV
SW	1250	1150	1150	1150	1150	1050	1000
RRF	0,1	0,1	0,1	0,15	2	2,5	3
KS	152000	152000	152000	100000	50000	24000	24000
F	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
DW	750	750	750	750	750	750	750
KD	45000	45000	45000	35000	25000	22500	15000
Z1	8	8	8	8	8	8	8
Z2	2	2	2	2	2	2	2
PC	-15	-15	-15	-15	-15	-14	-12
PF	0	0	0	0	0	4,5	9

*U.H. : Unidad hidrológica.

** P\US : Parámetros \ Uso de suelo

*** AGR, BOS, PM, U : Agrícola, Bosques, Pradera-Matorral, Sin vegetación.

Fuente: Elaboración propia.

Como complemento para analizar la recalibración del modelo, se adjunta la comparación entre los caudales simulados según la precipitación modificada y la condición inicial, expresando la variación porcentual que existe entre ellas.

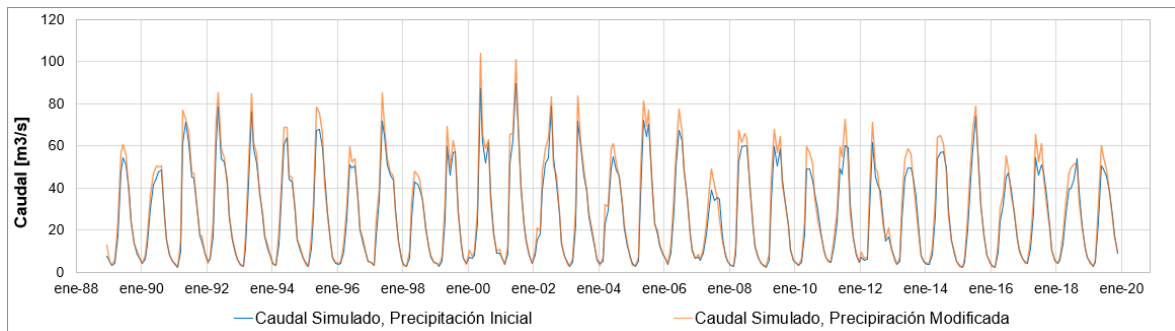


Figura 7.5 – Comparación entre caudales simulados según su precipitación inicial con su precipitación modificada, a escala mensual.

Tabla 7.4 – Variación porcentual entre caudales, modelación hidrológica con precipitación modificada, río Perquilauquén en San Manuel.

Periodo	Caudal Observado [m3/s]	Caudal Simulado [m3/s]	Variación [%]	Variación Inicial [%]	Diferencia [%]
may-91	138,32	76,78	44%	56%	12%
may-92	151,97	72,61	52%	60%	8%
jun-93	280,01	84,70	70%	73%	3%
jun-95	103,40	78,29	24%	35%	11%
jun-97	163,03	85,28	48%	56%	8%
jun-00	154,41	103,86	33%	44%	11%
jul-01	203,76	101,27	50%	56%	6%
jul-05	113,25	77,00	32%	38%	6%
jul-06	143,36	77,54	46%	53%	7%

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la recalibración del modelo proveniente de la iniciativa de modificar la precipitación inicial en un 10 [%] a los valores correspondientes a bandas de elevación superiores a 750 [m.s.n.m.], se distingue que dicha alteración no logra conseguir una serie de valores simulados que se ajusten a la serie de valores observados. Ya que, tal como se muestra en la Figura 7.2, el caudal simulado es insuficiente para alcanzar a ajustarse a la serie de caudales observados debido a persiste en inconveniente de la subestimación de los eventos de caudales *peak*. Dicha subestimación se evidencia en la Tabla 7.2, debido a que el indicador de *Nash-Sutcliffe* aun refleja una sensibilidad del modelo a los caudales observados *peak*, aunque al ser superior al valor de la eficiencia inicial, aún se mantiene la subvaloración a los caudales simulados medios-bajos. Ya que, su expresión logarítmica demuestra la compensación hacia los valores medio-bajos porque su magnitud aun es cercana a la cifra unitaria. Por su parte, el indicador *PBIAS* se mantiene en valor negativo y su eficiencia de *Kling-Gupta* aun no es cercana a un modelo ajustado por ser inferior a valor unitario.

De manera particular, la representación gráfica de los caudales mensuales promedios (Figura 7.3), tiende a ajustarse a los caudales observados y por su parte, las gráficas de dispersión tanto para la condición inicial (Figura 6.19) como para la condición de la precipitación modificada (Figura 7.4), se mantienen dentro un coeficiente determinístico de 0,8, evidenciando que la iniciativa de alterar el proceso meteorológico no provoca una variación significativa. Tal como lo deja en evidencia la Figura 7.5, ya que existe visualmente un aumento en el proceso meteorológico pero que produce una leve disminución en la variación porcentual entre los valores obtenidos en condiciones iniciales y la condición con la precipitación modificada (Tabla 7.4), ya que la variabilidad se encuentra entre un 3 [%] a un 12 [%] entre los caudales simulados para ambas condiciones de modelación.

Por consiguiente, una característica relevante en el desarrollo de la calibración de ambos modelos es la diferencia que se generó en la conductividad hidráulica saturada de la zona de raíces, que fue de 38000 [mm/mes] a 152000 [mm/mes] (Tabla 6.5),(Tabla 7.3). El crecimiento del parámetro generó una variación en el resultado de la evapotranspiración, tal como se muestra en la siguiente Figura:

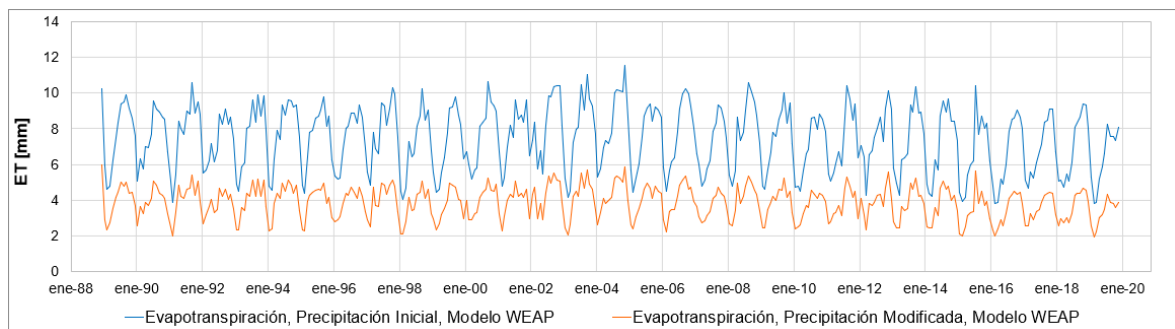


Figura 7.6 – Comparación entre Evapotranspiración según la precipitación inicial y la precipitación modificada, modelación hidrológica, a escala mensual.

En la figura se aprecia que existe una disminución en la magnitud de la evapotranspiración en la condición de precipitación modificada, lo cual indica que es sensible a proceso meteorológico. Esto es debido a que la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración de cultivo en el modelo *WEAP*, sus algoritmos de la metodología de cálculo son independientes a la precipitación ingresada al modelo [44]. Por lo tanto, según lo mencionado anteriormente sobre las diferencias identificadas en el proceso de recalibración del modelo, se decide aceptar a la modelación hidrológica proveniente de la modificación del proceso meteorológico, debido a que sus indicadores de bondad de ajuste (Tabla 7.2) son superiores a los obtenidos por el modelo inicial, a pesar de que persista el desajuste en su gráfica de series de caudales simulados (Figura 7.2), el rendimiento de la modelación logra ser clasificado como “Muy Bueno” según lo establecido en [46].

Como complemento y para entregar una respuesta al inconveniente del modelo hidrológico en los años de caudales *peak* observados (Tabla 7.4), se relaciona esta peculiaridad a la variación que existe en el uso de suelo de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel. Debido a que, según el *Timelapse*¹⁸ disponible por la plataforma *Google Earth Engine*, en los años en los cuales suceden los caudales *peak* observados (Figura 7.7); se aprecia una cobertura vegetal superior que los años actuales, en los cuales el caudal simulado se ajusta o supera al caudal observado (Figura 7.2).

¹⁸ *Google Earth Timelapse*
<https://earthengine.google.com/timelapse/>

Por consiguiente, la designación del uso de suelo dentro del modelo hidrológico es constante dentro del periodo de estudio, es decir, que no se aborda su variabilidad de uso en el tiempo. Influyendo en la conceptualización y los resultados simulados, ya que no se logra representar el avance de la intervención humana desarrollada en la cuenca, específicamente en la actividad agrícola dentro de la banda de elevación de los 500 [m.s.n.m.] [61], tal como se muestra en la Figura 7.7.

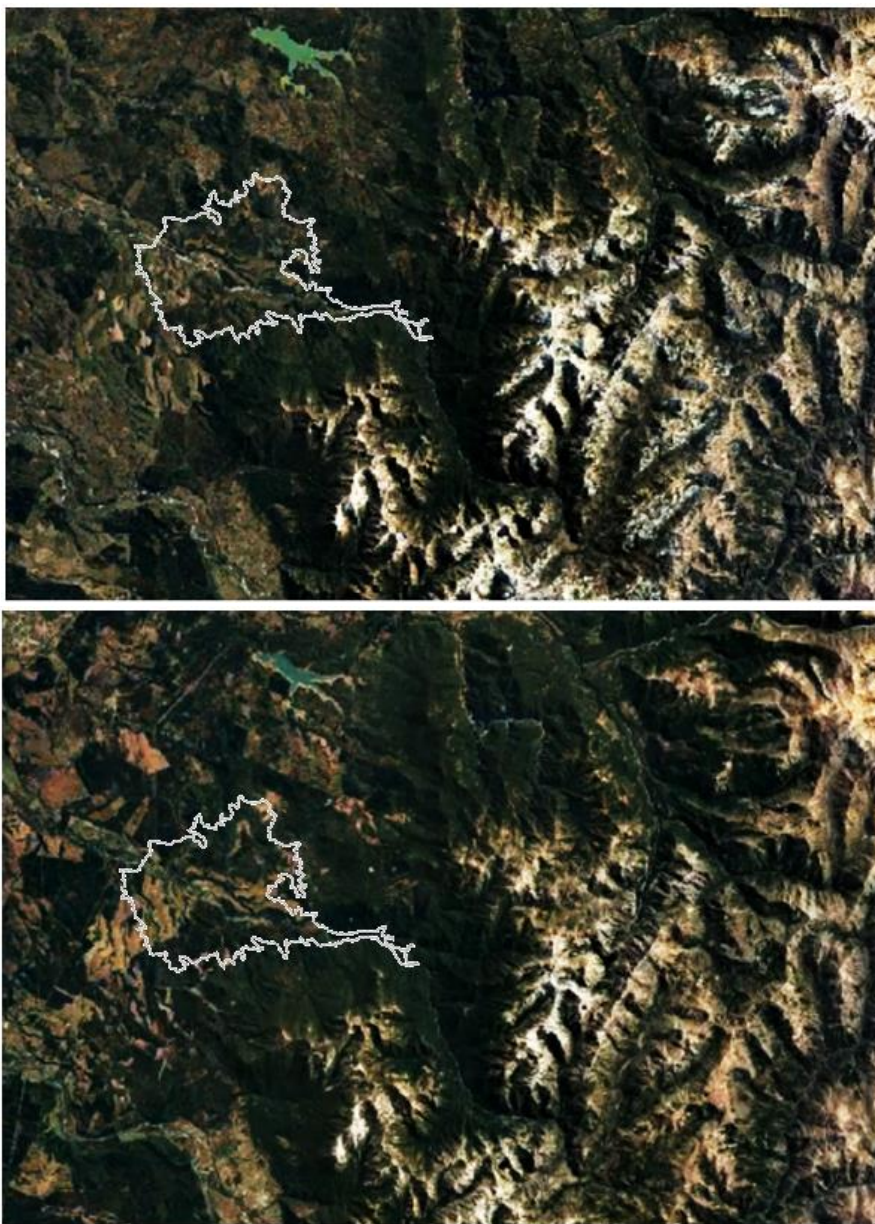


Figura 7.7 – *Timelapse* cuenca río Perqui Lauquén en San Manuel. Imagen superior: uso de suelo año 1993, imagen inferior: uso de suelo año 2018.

7.4. Tasas de evapotranspiración

Con la finalidad de evaluar la magnitud de cada proceso y explicar su comportamiento dentro del periodo de estudio previo a la evaluación con el producto de teledetección, se realiza la comparación de las alternativas de estimación, a saber, por instrumental de monitores, por expresión empírica y por modelación hidrológica, según cada tipo de tasa de evapotranspiración. Dicha comparación consiste en identificar y explicar las particularidades que existen entre las diferentes opciones de estimación de la evapotranspiración.

Cabe destacar que, se considera como modelo de comparación a las estimaciones de evapotranspiración de referencia y de cultivo correspondientes a la alternativa de instrumental de monitoreo. Esta elección es debido a que el evaporímetro de bandeja presenta una mayor eficiencia en determinar la necesidad de agua de una superficie de cultivo [80], en relación con las alternativas de estimación restantes, a saber, la expresión de *Penman y Monteith* y la modelación hidrológica.

7.4.1. Evapotranspiración de referencia

Las representaciones gráficas que muestran la comparación de la evapotranspiración de referencia para cada cuenca de estudio, según sus alternativas de estimación, serán las siguientes:

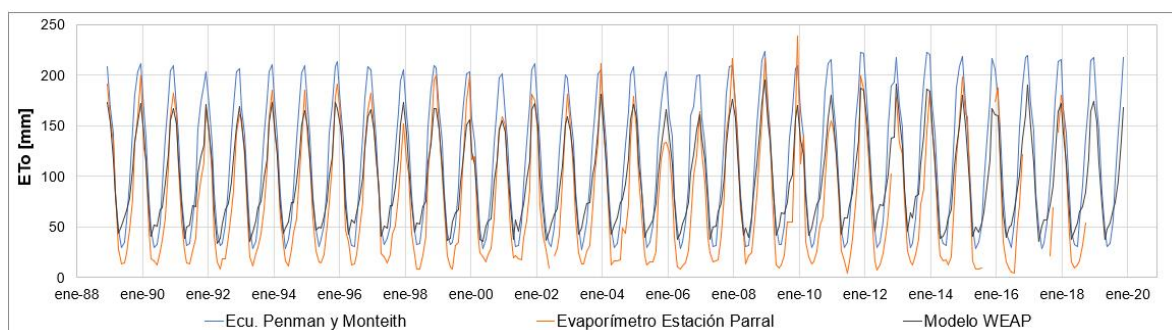


Figura 7.8 – Evapotranspiración de referencia según diferentes alternativas de estimación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual

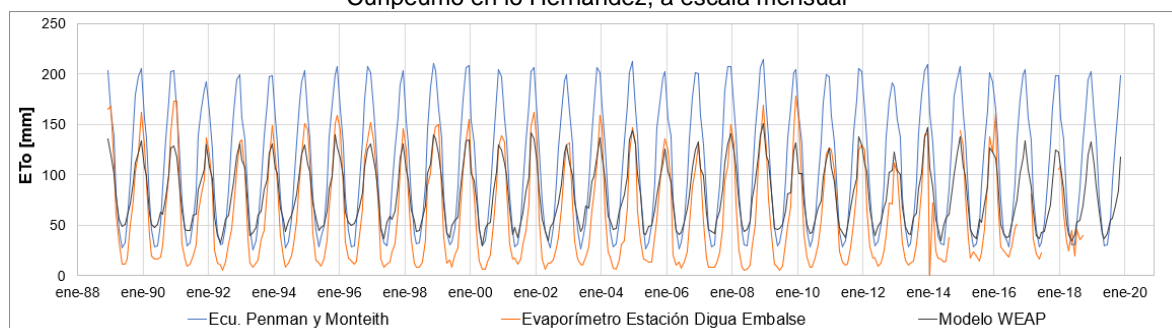


Figura 7.9 – Evapotranspiración de referencia según diferentes alternativas de estimación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala mensual.

Según la Figura 7.8, se aprecia que la ecuación de *Penman y Monteith* tiende a sobrestimar las magnitudes en los valores *peak* y subestimar los valores valle de la curva del evaporímetro de bandeja de la estación de Parral, en cambio la evapotranspiración de referencia estimada por el modelo *WEAP* tiende a ajustarse a las magnitudes *peak* del instrumental de monitoreo, pero aún se subestiman los valores valle de la curva.

Para el caso de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel (Figura 7.9), las magnitudes de la ecuación de *Penman y Monteith* presentan una mayor sobrevaloración en los valores *peak* y una subvaloración en los valores valle en comparación con el instrumental de la estación Digua embalse. Por su parte, la “ETo” perteneciente al modelo *WEAP* tiende a coincidir con las magnitudes *peak* de la curva del evaporímetro, pero son subestimadas en los periodos de invierno. Además, en ambas cuencas no se distingue una alteración en la temporalidad, solo difieren en sus magnitudes de evapotranspiración de referencia, tanto en meses estivales como en invierno, en relación con la alternativa del instrumental de monitoreo.

7.4.2. Evapotranspiración de cultivo

Las representaciones gráficas que muestran la comparación de la evapotranspiración de cultivo para cada cuenca de estudio, según sus alternativas de estimación, serán las siguientes:

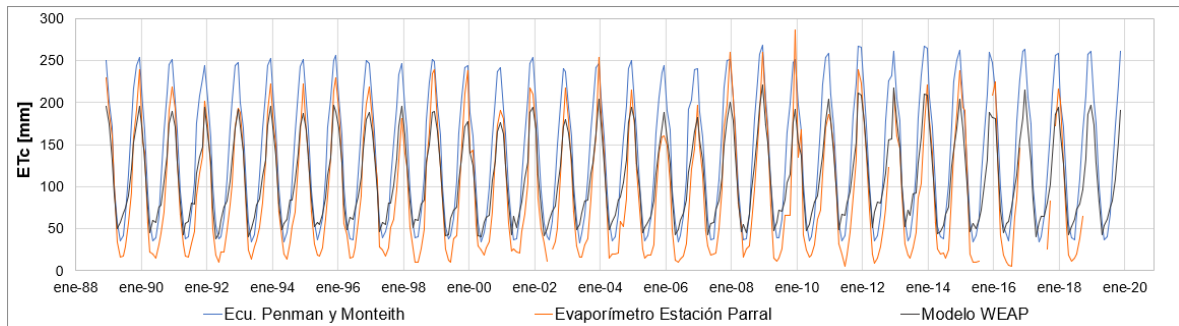


Figura 7.10 – Evapotranspiración de cultivo, coef. de cultivo arroz, según diferentes alternativas de estimación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual.

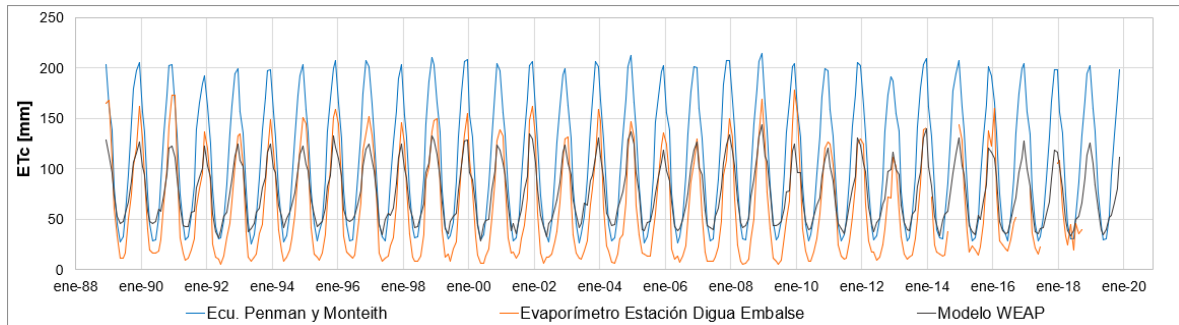


Figura 7.11 – Evapotranspiración de cultivo, coef. de cultivo coníferas, según diferentes alternativas de estimación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala mensual.

Con respecto a la evapotranspiración de cultivo, se aprecia que también para ambas cuencas no existe una variación en su temporalidad, manteniéndose las mismas características identificadas en la evapotranspiración de referencia. Solamente, se aprecia un aumento en la magnitud de los valores *peak* para la cuenca de estero Curipeumo en lo Hernández (Figura 7.10), a saber, de valores medios de 200 [mm] para la “ETo” a 250 [mm] para la “ETc”. En cambio, la evapotranspiración de cultivo perteneciente al área de drenaje río Perquilauquén en San Manuel (Figura 7.11), no se visualizan diferencias en comparación con la curva de la “ETo”. Esto es debido por el coeficiente que representa la actividad fenológica de cada cuenca de estudio, tal como se mencionó en el subcapítulo 8.2 denominado “Expresión empírica”.

7.4.3. Evapotranspiración

Las representaciones gráficas que muestran la comparación de la evapotranspiración considerando tanto al producto proveniente de la plataforma *EEFLUX* como al resultado derivado de la modelación hidrológica, correspondiente a cada cuenca, se muestran a continuación:

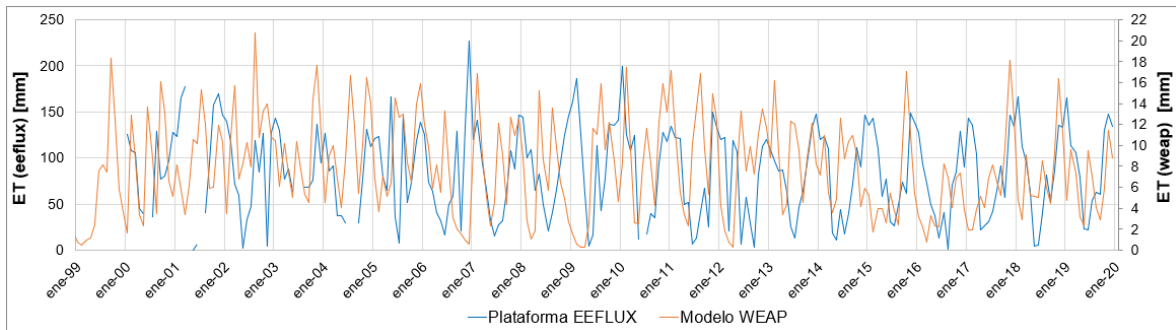


Figura 7.12 – Evapotranspiración, según diferentes alternativas de estimación, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual.

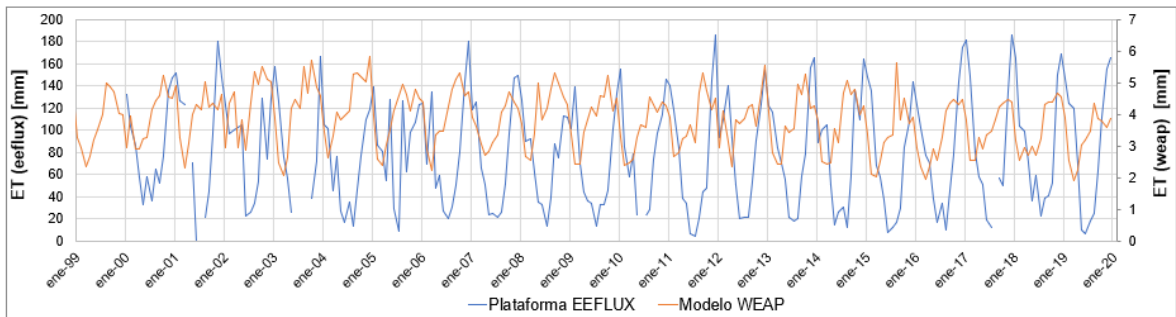


Figura 7.13 – Evapotranspiración, según diferentes alternativas de estimación, cuenca río Perquilauquén en San Manuel, a escala mensual.

De acuerdo con las Figuras 7.12 y 7.13, su característica más distintiva es la diferencia de magnitud que existe entre ambas alternativas, ya que los valores registrados por la plataforma *EEFLUX* se encuentran dentro del rango de los 20 [mm] a 180 [mm], en cambio las magnitudes pertenecientes al modelo *WEAP* no superan los 20 [mm] en ambas cuencas. Además, tanto en la cuenca estero Curipeumo en los Hernández (Figura 7.11) como en la cuenca río Perquilauquén en San Manuel (Figura 7.12), se muestra un claro desfase en su temporalidad, porque en ambas curvas no se aprecia que exista una tendencia al ajuste tanto en sus valores *peak* como en sus vales valle.

7.4.4. Discusión de tasas de evapotranspiración

Conforme a lo referenciado por [80], sobre la utilización de la alternativa del instrumental de monitoreo como modelo de comparación, las estimaciones que derivan del evaporímetro de bandeja entrega valores adecuados para predecir la evapotranspiración de referencia, ya que a pesar de que los atmómetros ofrecen una estimación más precisa, se recomiendan los evaporímetros debido que la placa de *Bellami* del atmómetro es susceptible a daños por heladas [81]. Aunque, su precisión depende de la fiabilidad que posean los coeficientes de bandeja, la aplicación de evapotranspiración de referencia proveniente del evaporímetro en lograr estimar la evapotranspiración de cultivo para modelos de precipitación-escorrentía, entrega estimaciones aceptables según lo indicado en [82].

Entonces según las Figuras 7,8 y 7.9, las “ETO” estimada por los respectivos evaporímetros permiten ofrecer una estimación “aceptable”, a pesar de ser observaciones puntuales y no exista una confirmación actualizada de la fiabilidad de los coeficientes de bandeja utilizados (Tabla 6.1), ya que la única diferencia que existe entre la “ETO” y la “ETc”, es la cuantificación de la capacidad de perder agua producto de la actividad fenológica, debido a que ambas poseen condiciones hídricas ilimitadas¹⁹.

Ahora bien, según los resultados obtenidos para cada cuenca, existe una clara diferencia entre la “ETO” de la expresión empírica con la obtenida por el modelo *WEAP*, a pesar de que ambas tienen como base la fórmula de *Penman y Monteith*. Sus diferencias radican en la información de radiación solar ingresada, ya que el modelo *WEAP* posee la particularidad de calcular la radiación solar por medio de la expresión de radiación solar derivada de la duración relativa de la insolación o la fórmula de *Angstrom*²⁰ [82], por lo que en el modelo es posible ingresar el valor de “Fracción de nubosidad” o en su defecto el modelo de manera predeterminada considera un valor unitario que significa ausencia de nubosidad. En cambio, por la escasez de información meteorológica de la radiación solar entrante, se utilizó la estimación proveniente de la expresión de radiación de *Hargreaves* [3] en la ecuación de *Penman y Monteith*.

Por lo que, de los resultados de evapotranspiración de referencia considerando diferentes formas de estimar la radiación solar entrante, la “ETO” del modelo *WEAP* es más confiable que la estimada por la expresión empírica, porque la fórmula de *Angstrom* tiene mayor precisión que la expresión de *Hargreaves* al ser comparadas en la ecuación de *Penman y Monteith* [83]. Por esta razón, visualmente la curva de “ETO” del modelo *WEAP* tiende a ajustarse a los valores *peak* asociados a los meses estivales del instrumental de monitoreo.

Además, la diferencia en los valle de estas alternativas se le puede atribuir a que las expresiones empíricas se limitan a zonas próximas de una estación meteorológica [83], por lo que al representar a escala de cuencas hidrográficas y el no tener suficientes estaciones de monitoreo, es de esperar que las variables que influyen en el proceso de evaporación por medio de distribuciones espaciales, muestren un grado de incertidumbre en su estimación, debido a que la expresión empírica de *Penman y Monteith* es sensible a las variables climáticas como la radiación solar, la velocidad del viento o la temperatura del aire [84], [85]. Cabe destacar que, para ambas cuencas, se disponen de limitadas estaciones meteorológicas que tengan información continua y confiable (Tabla 4.2),(Tabla 4.4), a saber, para la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández corresponde la estación de Parral y para la cuenca río Perquilauquén en San Manuel será la estación Digua Embalse.

¹⁹ *Physical Geography, Glossary of Terms*

http://www.physicalgeography.net/physgeoglos/p.html#potential_evapotranspiration

²⁰ *WEAP*, Foro de Usuarios, “Solar radiation estimation using the soil moisture method”

<https://www.weap21.org/index.asp?action=9&read=3320&fID=30>

Por consiguiente, para el caso de la evapotranspiración de cultivo, ambas cuencas mantienen una temporalidad en comparación con la “ETc” de su respectivo instrumental de monitoreo, debido a que ofrecen resultados “aceptables” para modelos de precipitación-escorrentía [82]. Sin embargo, la diferencia de “ETc” entre cuencas de estudio, es la magnitud que presenta la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández. Debido a que, la evapotranspiración de cultivo en la cuenca antes mencionada posee una ponderación de un coeficiente de cultivo “Kc” de magnitud superior que el utilizado en la cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

En el caso de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, se mantiene constante la diversificación del estado de desarrollo del cultivo, siendo invariable el valor del coeficiente de cultivo del arroz (Tabla 5.2), debido a que la cuenca presenta un predominio de este cereal [49]. A su vez, para el caso de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, posee un coeficiente de cultivo de valor unitario debido a su uso de suelo preponderante [3], [67], a saber, plantaciones de bosques, que específicamente son la especie pino insigne o radiata (Tabla 5.8).

De manera adicional, el grado de confiabilidad que existe entre los valores de evapotranspiración de cultivo en relación con la estimación proveniente del instrumental de monitoreo, se muestran a continuación:

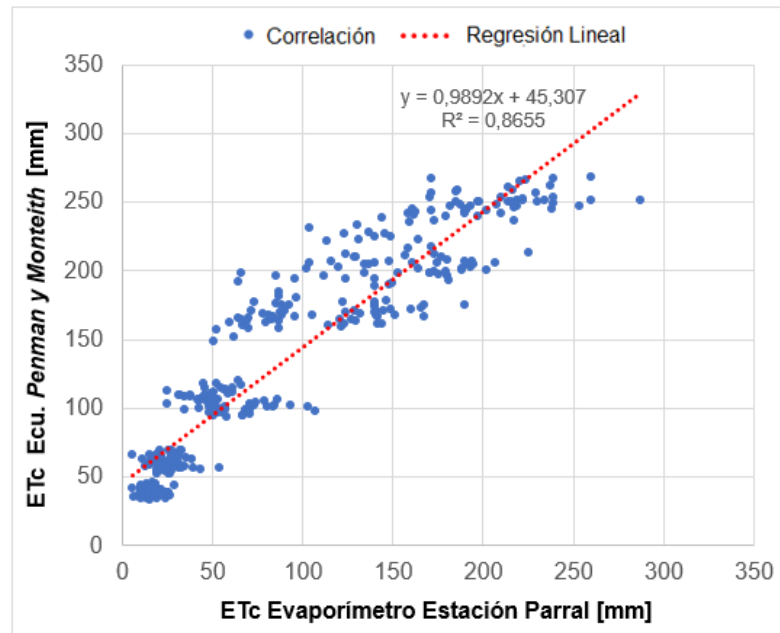


Figura 7.14 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” ecuación *Penman y Monteith*, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

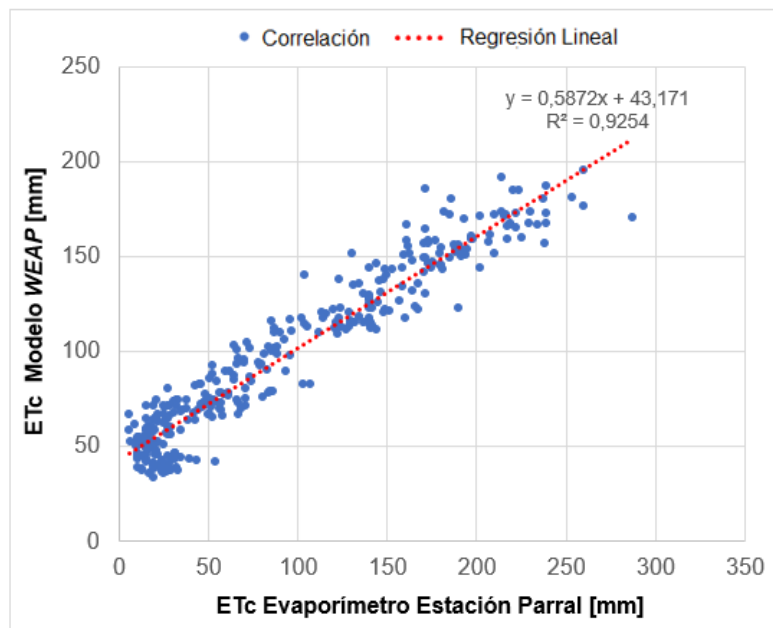


Figura 7.15 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” modelo *WEAP*, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

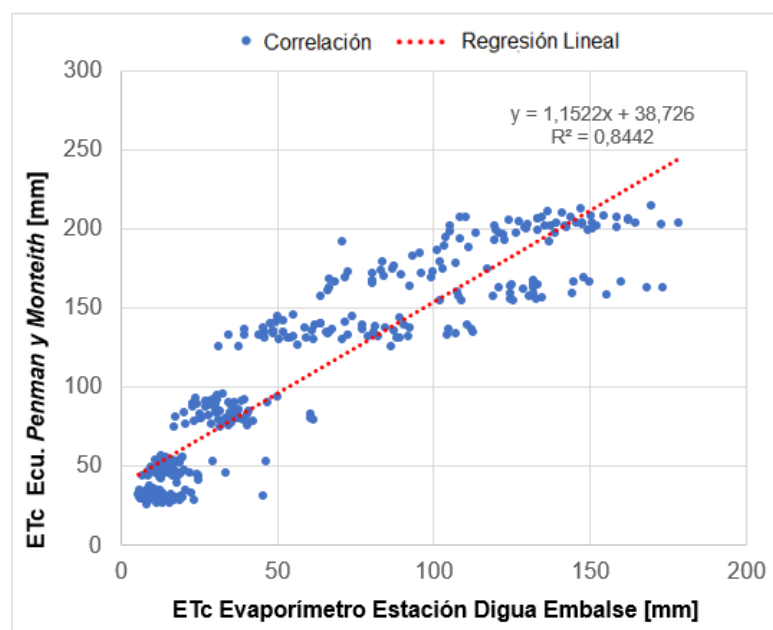


Figura 7.16 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” ecuación *Penman y Monteith*, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

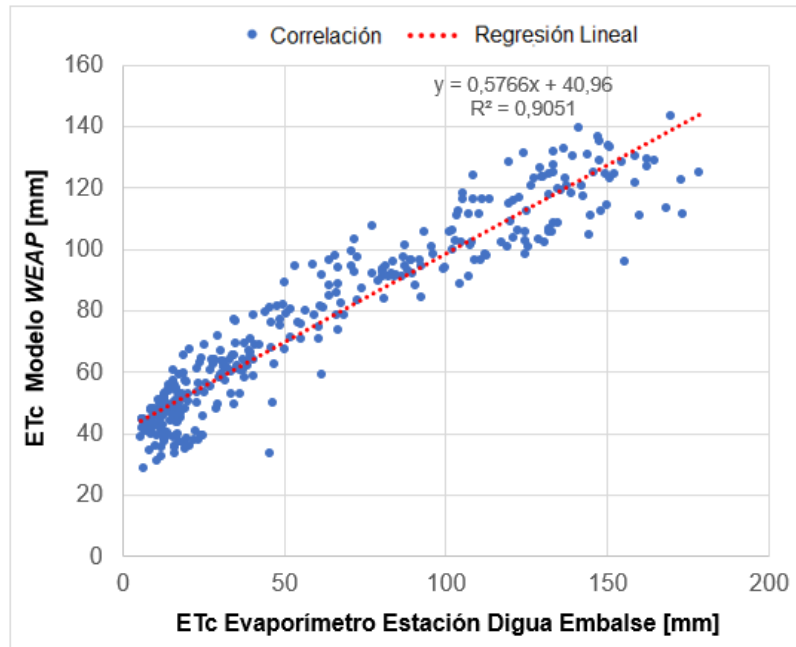


Figura 7.17 – Correlación entre “ETc” evaporímetro y “ETc” modelo *WEAP*, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

De acuerdo con las gráficas de dispersión, se considera como variable independiente a las evapotranspiraciones de cultivo pertenecientes al instrumental de monitoreo porque es la tasa de evapotranspiración que ofrece valores “aceptables” aplicados a modelos de precipitación-escorrentía [82]. Para la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, los coeficientes determinísticos para las “ETc” de la ecuación de *Penman y Monteith* (Figura 7.14) y del modelo *WEAP* (Figura 7.15) son de 0,8655 y 0,9254 respectivamente, considerando que en condiciones en las cuales la “ETc” del evaporímetro de bandeja es nula, existe una magnitud de evapotranspiración de cultivo proveniente de otras alternativas de estimación. Aunque ambas se acercan al valor unitario, la magnitud de la correlación de la “ETc” del modelo *WEAP* es superior que la obtenida por medio de la expresión de *Penman y Monteith*.

Confiabilidad que concuerda con lo antes mencionado sobre la precisión que ofrece la expresión de *Angstrom* por sobre la de *Hargreaves* al estimar la radiación solar requerida en la ecuación de la evapotranspiración de referencia de *Penman y Monteith*, fórmula base del modelo *WEAP* [83], ya que la razón de las diferencias de magnitud entre la “ETo” y la “ETc” es su respectivo coeficiente de cultivo. De manera similar, la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, presenta coeficientes determinísticos en donde se mantiene la superioridad en su magnitud los valores de la evapotranspiración de cultivo del modelo *WEAP* (Figura 7.16) por sobre los valores de la expresión empírica (Figura 7.17), a saber, de 0,9051 y 0,8442.

Cabe destacar que, en las Figuras 7.14 y 7.16, pertenecientes a la gráfica de dispersión de la ecuación de *Penman y Monteith*, se aprecia la peculiaridad de la formación de cúmulos en ambas gráficas. Esta característica indica simplemente la estacionalidad marcada que ofrece la ecuación de *Penman y Monteith* en periodos mensuales [86], debido a su sensibilidad a las variables climáticas [84], [85]. Dicha estacionalidad se muestra en las siguientes Figuras:

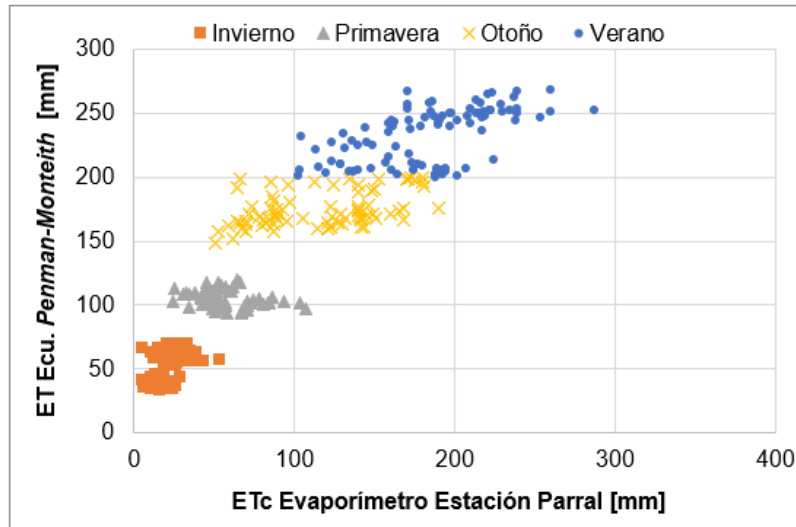


Figura 7.18 – Estacionalidad, Ecuación *Penman* y *Monteith* cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

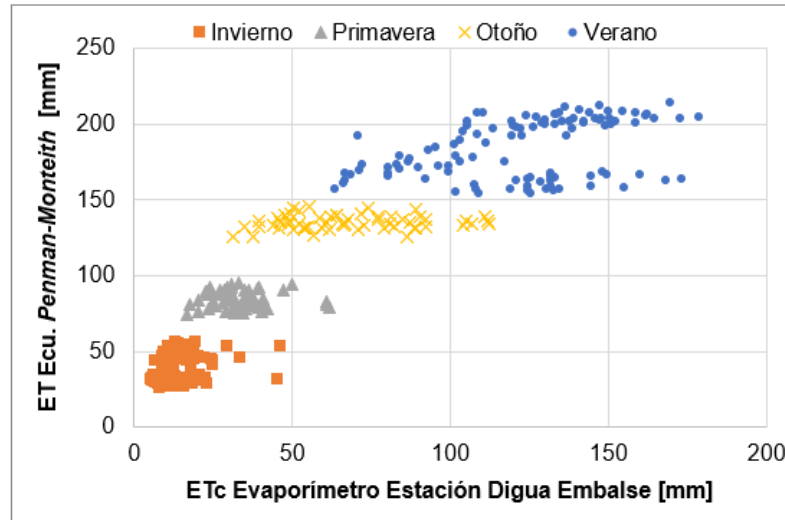


Figura 7.19 – Estacionalidad, Ecuación *Penman* y *Monteith* cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Por su parte, la evapotranspiración obtenida del modelo *WEAP* en comparación con la información registrada por imágenes satelitales, difieren en magnitud y temporalidad en ambas cuencas. Esto puede deberse precisamente por el significado que posee la “ET” o la *actual evapotranspiration*, el cual representa la cantidad de agua que realmente se elimina de una superficie debido a los procesos de evaporación y transpiración [72].

Según [82], en un terreno árido en el cual no existe humedad del suelo y solo esté presente el poder evaporante de la atmósfera, la evapotranspiración será nula, debido a que el terreno no dispone de las condiciones hídricas mínimas para que exista transpiración. Lo que implica que solo debería existir el proceso de evaporación a nivel superficial, ya que los flujos de calor y vapor de agua no tienen ningún efecto sobre la atmósfera, ósea existe una acumulación de radiación o sobrecalentamiento en la superficie del terreno.

Ahora bien, manteniendo las mismas condiciones de poder evaporante, bajo un evento de precipitación sobre alguna cobertura de cultivo o vegetación, el proceso de transpiración participará en las pérdidas del recurso hídrico sobre la superficie del terreno, aumentado así la magnitud de la evapotranspiración. Por consiguiente, si existe una saturación en la humedad del suelo que permita condiciones hídricas ilimitadas, la pérdida real de agua sobre la superficie corresponderá a la evapotranspiración de cultivo.

Entonces, se infiere que los valores obtenidos por el modelo *WEAP* considerando la metodología de la humedad del suelo, reflejan que la dinámica del terreno tiende a retener el recurso hídrico, restringiendo la pérdida de agua por medio de la evapotranspiración. Esto explica que, la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández (Figura 7.12), presenta un uso de suelo agrícola [55], con magnitudes de evapotranspiración superiores que la cuenca río Perquilauquén en San Manuel (Figura 7.13), la cual tiene un uso de suelo forestal (Tabla 5.8) y donde existe la presencia de un acuífero denominado Río Perquilauquén [61], el cual posee un coeficiente de almacenamiento inferior que el existente en la cuenca del estero Curipeumo en lo Hernández. Además, según sus parámetros agronómicos/hidrológicos (Tabla 7.3), esta cuenca posee una conductividad hidráulica saturada en la zona de raíces superior a la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

Los resultados obtenidos con la plataforma *EEFLUX*, tienden a ser semejantes a las magnitudes de la evapotranspiración de cultivo (Figura 7.12), (Figura 7.13), por lo cual, se dispondrá a evaluar la relación existente entre ambas tasas de evapotranspiración.

7.5. Evaluación de la evapotranspiración por teledetección

Según las Figuras 6.5 y 6.16, la evapotranspiración correspondiente a la cuenca de uso de suelo forestal presenta valores medios superiores en los meses estivales a diferencia que la cuenca de uso de suelo agrícola, a saber, de 180 [mm] y 160 [mm] respectivamente. En cambio, en meses de invierno ambas cuencas registran una magnitud del proceso cercana a los 20 [mm] aproximadamente. Por consiguiente, debido a que estas magnitudes son similares a las estimaciones de evapotranspiración de cultivo para ambas cuencas (Figura 6.5)(Figura 6.16), se considera la evaluación de información por percepción remota con esta tasa de evapotranspiración. Cabe señalar que, su elección como medio de comparación para evaluar a la evapotranspiración por teledetección, es debido a que en condiciones en las cuales no exista alguna restricción hídrica en el suelo, la “ET” tiende a alcanzar a la “ETc” [87].

Por lo tanto, las gráficas que ilustran la comparación que existe entre dichas tasas de evapotranspiración correspondientes a ambas cuencas, se muestran a continuación:

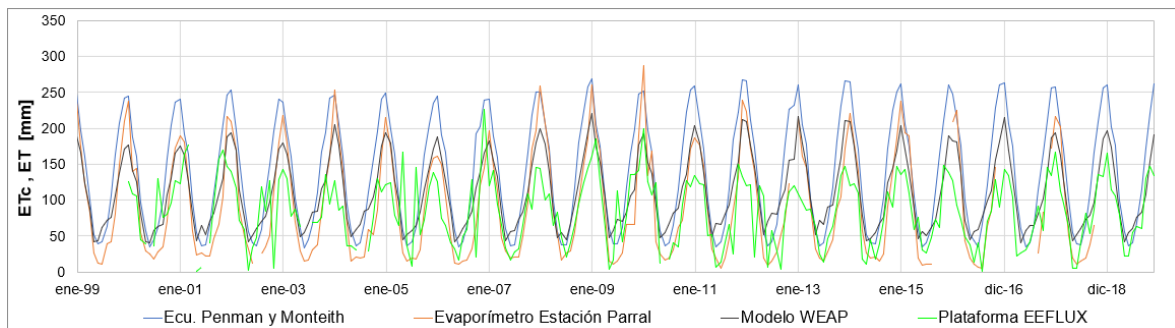


Figura 7.20 – Comparación entre de evapotranspiración de cultivo y evapotranspiración por teledetección, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, a escala mensual.

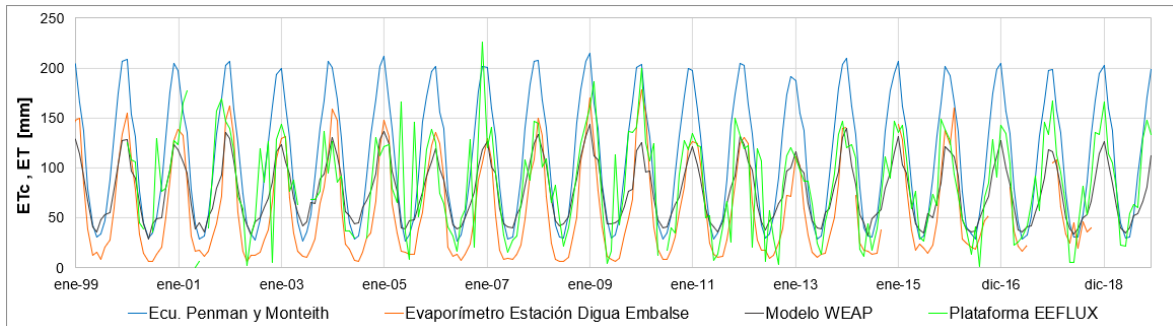


Figura 7.21 – Comparación entre de evapotranspiración de cultivo y evapotranspiración por teledetección, cuenca río Perquiilauquén en San Manuel, a escala mensual.

De manera preliminar, se aprecian en las Figuras 7.20 y 7.21, que las curvas pertenecientes a la plataforma *EEFLUX*, tienden a ajustarse a los resultados provenientes de las alternativas de estimación de la evapotranspiración de cultivo. En la cuenca río Perquiilauquén en San Manuel, la información por teledetección posee un comportamiento similar con los valores de la “ETc” derivados del evaporímetro de la estación Digua embalse, tanto en las magnitudes *peak* y valle. En cambio, la evapotranspiración de cultivo proveniente del modelo *WEAP* presenta tanto valores *peak* como valle, levemente inferiores a la curva de la “ET” de la plataforma *EEFLUX*. Por el contrario, en la curva perteneciente a la ecuación de *Penman y Monteith*, se notan magnitudes superiores en las zonas *peak* de la curva de “ET” pero en zonas de valle logra asemejarse a la curva de evapotranspiración.

Por consiguiente, en la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, los valores de evapotranspiración por teledetección tienden a tener un comportamiento semejante en las zonas valle de las curvas de “ETc” disponibles, pero son inferiores en las zonas *peak* de las diferentes alternativas de estimación de la evapotranspiración de cultivo. Lo que implica que, para el caso de la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández en los meses de invierno la evapotranspiración por teledetección dentro del periodo de estudio consigue acercarse a los valores de evapotranspiración de cultivo, pero no subestima la pérdida del recurso hídrico en meses estivales. Por el contrario, en la cuenca río Perquiilauquén en San Manuel, la información por percepción remota logra reproducir de manera similar la curva de evapotranspiración de cultivo desarrollada por el instrumental de monitoreo.

Debido a que la alternativa de estimación correspondiente al evaporímetro de bandeja es considerada como un indicador de evaluación para la evapotranspiración de cultivo [88], la comparación de la evapotranspiración por teledetección expresada según su grado de dispersión será la siguiente:

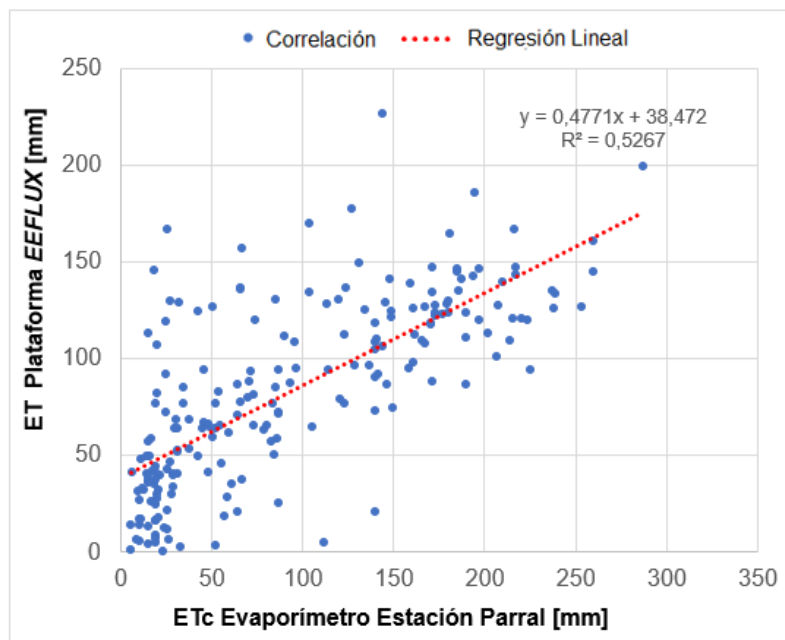


Figura 7.22 – Correlación entre “ETc” evaporímetro estación Parral y “ET” plataforma *EEFLUX*, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

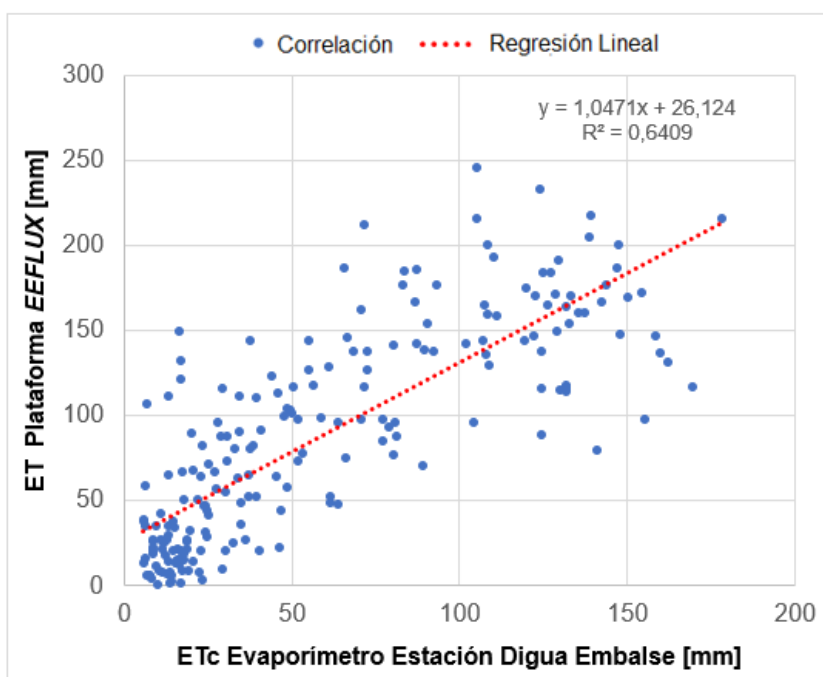


Figura 7.23 – Correlación entre “ETc” evaporímetro Estación Diga embalse y “ET” plataforma *EEFLUX*, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

De acuerdo con las Figuras de dispersión obtenidas para ambas cuencas, se aprecia que existe una distorsión de puntos permanentes al relacionar las evapotranspiraciones de cultivo con la respectiva evapotranspiración por teledetección, ya que independiente del uso de suelo predominante, no se evidencia una convergencia de los puntos correlacionados.

La alternativa de estimación procedente al instrumental de monitoreo, en ambas cuencas se nota una divergencia de los valores de la correlación, aun así, en la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, correspondiente al evaporímetro de la estación Digua embalse (Figura 7.23) tiene un coeficiente determinístico superior que el conseguido por el evaporímetro de la estación de Parral perteneciente a la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández (Figura 7.22), a saber, de 0,6409 y de 0,5267 respectivamente. Por lo tanto, a pesar de que la plataforma EEFLUX utilice la metodología de balance energético [17] en sus capturas para ofrecer como producto un registro de evapotranspiración [38], los factores microclimáticos producidos por el efecto de advección [74] influyen en el proceso de evaporación dentro de una superficie de cultivo [73].

Debido a que, el proceso de evaporación en la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández es superior que la registrada por la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, y que la evapotranspiración por teledetección registrada por esta última tiende a ajustarse a las magnitudes de la "ETc", ofreciendo un grado de confiabilidad de un 64 [%] [63]. La "ET" proveniente de la plataforma *EEFLUX* subestima el proceso de evaporación sobre una superficie de cultivo con demandas hídricas agrícolas.

Por consiguiente, teniendo en consideración la metodología que utiliza la plataforma EEFLUX en obtener la evapotranspiración, según [89], el método de balance energético superficial a escala de cuencas hidrográficas por medio de la teledetección es sensible a los cambios en las condiciones climáticas, como la cobertura de nubosidad o los factores microclimáticos ya antes mencionado [74]. Además, la ecuación de balance como medio para registrar la evapotranspiración por percepción remota, subestima la pérdida de agua que existe en superficies agrícolas a nivel de cuencas, debido a que no considera de manera explícita las características presentes en la superficie, como el proceso de transpiración generado por la actividad fenológica o las fuentes de abastecimiento, tales como, el riego o el aporte de acuíferos, tal como sucede en el caso de la cuenca de estero Curipeumo en lo Hernández.

Con respecto a la escala en la cual se desarrolló el estudio, la evapotranspiración por teledetección no logra representar la pérdida del recurso hídrico a nivel de cuencas hidrográficas, debido a que estimar la tasa de evapotranspiración por medio de variables climáticas captadas por percepción remota requiere considerar la distribución de todas las magnitudes captadas dentro de la cuenca, lo que dificulta la precisión de la estimación [90]. Por esta razón, el producto de evapotranspiración disponible por teledetección se ajusta a las observaciones in situ de instrumentales de monitoreo de *Eddy Covariance* [91]. Por lo tanto, a nivel de cuencas hidrográficas, la evapotranspiración por percepción remota no ofrece información precisa del proceso.

De manera adicional, otros factores que influyen en eficiencia y precisión de la evapotranspiración por teledetección son la disponibilidad temporal de la información y la calidad de las imágenes. Ya que la exactitud de proceso depende de la temporalidad que existe entre imágenes y la presencia de errores de captura propias del satélite. Según [91], las escalas de tiempo diarias para la estimación de evapotranspiración en base a variables climáticas captadas por imágenes satelitales ofrecen un balance energético sin discrepancias y a su vez una "ET" más precisa. Por ende, si se dispone de una distribución temporal entre imágenes satelitales acotada, la incertidumbre del proceso de evapotranspiración por teledetección disminuye.

Ahora bien, con respecto a la calidad de la captura, las imágenes satelitales disponibles por la plataforma EEFLUX, presentan falencias en sus capturas debido al error del sensor ETM+ del satélite Landsat 7 [66]. Tal como se muestra en la Figura 4.15, las imágenes satelitales presentan un efecto “gaps” que limitan la información entregada por la imagen. Por esta razón, para el caso de imágenes satelitales ya procesadas en un producto en particular, que es la evapotranspiración, se utiliza la metodología de reconstrucción en base a geoestadística de múltiples puntos [92], el cual consiste en describir un conjunto de datos de imágenes satelitales que varíen en el tiempo, favoreciendo a la interpolación dentro del periodo de vacíos. Según [92], cualquier interpolación implica incertidumbre en las ubicaciones reconstruidas, y esta incertidumbre depende del nivel de variabilidad espacio - temporal del fenómeno considerado. Por lo tanto, para subsanar el efecto gaps de las imágenes satelitales se debe disponer de una amplia variabilidad temporal. Para esto, se requiere que la información sea continua en intervalos de tiempo acotados (niveles diarios), para estimar una evapotranspiración por teledetección calibrada y reducir su incertidumbre.

Capítulo 8

Conclusiones y comentarios

La evaluación de la evapotranspiración por teledetección corresponde al análisis desarrollado a la combinación de los procesos de transferencia hídrica desde una superficie de suelo hacia la atmósfera, derivada de la metodología de balance energético superficial que ofrece la plataforma *EEFLUX*, como opción disponible para estudios o modelos hidrológicos.

Producto de que las alternativas de estimación integran a los procesos del ciclo hidrológico; la evaluación de la evapotranspiración por percepción remota considera como medio de comparación a la tasa de evapotranspiración que desarrolla un cultivo bajo condiciones hídricas óptimas porque la evapotranspiración desarrollada sobre una superficie de suelo sin restricciones de humedad representa de manera similar al proceso de la "ETc".

En la macrocuenca del río Maule, perteneciente a la VII región, el área de estudio de uso de suelo agrícola, la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández y de uso de suelo forestal, la cuenca río Perquilauquén en San Manuel, presentaron características relevantes para el desarrollo de la evaluación.

La alternativa de estimación por medio de la expresión empírica utiliza la ecuación de *Penman y Monteith*, validada por la FAO y la ASCE para establecer la evapotranspiración de referencia y de cultivo. Sin embargo, la ecuación es sensible a las variaciones climáticas que componen su expresión, a saber, la radiación solar, la velocidad del viento o la temperatura del aire. Lo que implica que, la precisión de expresión empírica se limita a las zonas próximas de una estación meteorológica, favoreciendo la incertidumbre de la estimación si no se dispone de las estaciones necesarias que permitan reproducir la distribución espacial de las variables meteorológicas dentro de la cuenca, como es el caso de la cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

Para estimar la evapotranspiración de cultivo en base a la expresión de *Penman y Monteith*, los coeficientes de cultivo designados para el uso de suelo dominante de cada cuenca, establecen la diferencia en magnitudes para ambas áreas de estudio. Debido a que, los coeficientes de cultivo no solo representan la etapa fenológica del cultivo, sino también su grado de emisividad térmica. Tal como lo demuestran las cuencas de estudio, ya que la producción de arroz se desarrolla sobre una superficie inundada, generando una mayor emisividad térmica que la irradiada por la estructura vegetativa perteneciente a la especie forestal de pino insigne o radiata. Por lo tanto, la alternativa de estimación de la expresión empírica no cumple con la finalidad de evaluar la evapotranspiración por percepción remota de la plataforma *EEFLUX*, debido a que requiere de información meteorológica confiable con una incertidumbre reducida, para sus distintas variables que integra la ecuación; por su sensibilidad a la disposición de las estaciones de monitoreo y por su aplicación con el coeficiente de cultivo, al permitir reflejar las etapas del desarrollo de la planta que la ecuación del balance energético no consigue reproducir.

La aplicación de la modelación hidrológica como alternativa para estimar las pérdidas hídricas de una cuenca, considerando la metodología de la humedad del suelo del modelo *WEAP*, permite reproducir según las designaciones de uso de suelo y condiciones climáticas, la dinámica de suelo de la cuenca. Sin embargo, requiere de información meteorológica fiable para reducir la incertidumbre en la simulación de las variables de interés, como lo refleja la cuenca río Perquilauquén en San Manuel. La limitación de información meteorológica disponible dentro del área de estudio, obliga a recalibrar el modelo considerando la modificación del proceso de precipitación, debido a eventos de escurrimiento superficiales *peak* dentro del periodo de estudio.

La precipitación modificada, como información de entrada, genera una variación tanto en la representación de la dinámica de suelo como en los resultados simulados. Al incrementar la precipitación, la conductividad hidráulica satura en la zona de raíces debió aumentar para el caso de la cuenca con uso de suelo forestal, siendo un parámetro agronómico/hidrológico sensible que influye en la magnitud de la evapotranspiración.

Con respecto a la variable climática de la radiación solar, el modelo hidrológico establece la metodología de cálculo dependiendo del ingreso u omisión de la fracción de nubosidad. Lo que influye en la exactitud de los resultados de la evapotranspiración de referencia, dependiendo del uso de las expresiones de Hargreaves o de Angstrom. Siendo esta última, la ecuación que ofrece una mayor precisión para la estimación de la radiación solar. Si bien, la modelación hidrológica utiliza la metodología de la humedad del suelo para reproducir las pérdidas de agua en la cuenca, el ingreso de información poco confiable debido a la falta de observaciones o la omisión de alguna variable climática como lo es la fracción de nubosidad, genera sensibilidad en los resultados simulados y reduce su fiabilidad para evaluar la evapotranspiración por teledetección.

Por ende, para estudiar su exactitud y confiabilidad se utilizan las observaciones registradas por instrumentos especializados. Según la información disponible perteneciente al instrumental de monitoreo, el proceso de evaporación que ocurren en superficies de cultivo es superiores que, en suelos forestales. Debido a que, el proceso perteneciente a la cuenca estero Curipeumo en lo Hernández, de uso de suelo destinado a la producción de arroz, es sensible a los factores microclimáticos por efectos de advección dentro de una superficie de cultivo favoreciendo la evaporación. Además, la precisión que ofrece el evaporímetro de bandeja para estimaciones de evapotranspiración de cultivo es eficiente para establecer la necesidad de agua que requiere una superficie de cultivo. Por lo tanto, en relación con la evapotranspiración por teledetección, la plataforma *EEFLUX* ofrece un producto que subestima el proceso de evaporación sobre superficies de cultivo con demandas hídricas agrícolas.

Finalmente, de manera particular el analizar la evapotranspiración por teledetección por medio de sus características, tales como, su metodología de cálculo, la escala en que se desarrolla la evaluación, su variabilidad temporal de la información o su calidad en la imagen; establecen condicionantes para la precisión de su aplicación en la hidrología. Con respecto a su metodología de cálculo, la plataforma *EEFLUX* utiliza la ecuación del balance energético según la teledetección de las variables meteorológicas necesarias. Sin embargo, la expresión no integra la actividad fenológica de la superficie o fuentes de abastecimiento externas, lo que implica que la metodología del balance energético superficial subestima la pérdida real del recurso hídrico en superficies agrícolas a nivel de cuencas hidrográficas. Ahora bien, la escala espacial de la captura también define la exactitud de la evapotranspiración por teledetección, ya que a nivel de cuencas hidrográficas, existe una mayor variabilidad en magnitudes climáticas. Por esta razón, la evapotranspiración por teledetección no es aplicable a nivel de cuencas, sino más bien, para estudios puntuales por su comportamiento similar a instrumentales con variabilidad espacial limitada (*Eddy Covariance*).

Por último, la disponibilidad temporal entre imágenes y la presencia de errores de captura, influyen en la eficiencia y exactitud de la evapotranspiración por percepción remota. Debido a que, la exactitud del proceso requiere de información en intervalos de tiempo acotado para disminuir las discrepancias desarrolladas por el balance energético y disponer de información para subsanar los errores de captura por medio a procesos reconstructivos.

En resumen, la aplicación de la evapotranspiración por teledetección disponible en la plataforma *EEFLUX*, como alternativa de fuente de información en la hidrológica. Tiene un comportamiento más preciso para zonas de estudio acotadas como es el caso de predios agrícolas y para el desarrollo de análisis de disponibilidad hídrica.

Referencias bibliográficas

- [1] L. Stowhas, *Fundamentos de Hidrología aplicada*. Valparaíso, Chile: Universidad técnica Federico Santa María, 2017.
- [2] A. Mehta, A. Prados y E. Podest, “Resumen General de la Evapotranspiración”, *NASA: Applied Remote Sensing Training*, 2017. [En línea]. Disponible en: https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day3/S6P1-span.pdf [Accedido: 08-mayo-2020].
- [3] R. Allen, L. Pereira, D. Raes y M. Smith, “Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, en *Estudio FAO Riego y Drenaje*, vol. 56, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia, 2006, pp.15-28.
- [4] L. Kumar and O. Mutanga, *Google Earth Engine Applications*. Basel, Switzerland: MDPI, 2019.
- [5] R. Allen et al., “EEFLUX: a Landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine,” in *2015 ASABE/IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation*. <https://doi.org/10.13031/irrig.20152143511>.
- [6] V. T. Chow, D. Maidment y L. Mays, *Hidrología Aplicada*, Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw - Hill Interamericana S.A., 1994.
- [7] K. Wang and R. Dickinson, “A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability”, *Reviews of Geophysics*, vol. 50, no. 12, pp. 1-54, May 2012.
- [8] F. Padilla y R. Junconsa, “Evaporación y Transpiración. Evapotranspiración”, en *Hidrología Superficial y Subterránea*, Departamento de Tecnología de la Construcción, Universidad de Coruña, 2013, pp.43-64.[En línea]. Disponible en: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo_4.pdf [Accedido: 07-sep-2020].
- [9] J. Diez, “Evaporación y Evapotranspiración”, en *Ciencias de la Tierra*, Instituto de Física Arroyo Seco, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires , 2018, pp. 42-61.[En línea]. Disponible en: <https://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra/apuntes/unidad3.pdf> [Accedido: 07-sep-2020].
- [10] M. Sánchez-Toribio, *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*, Logroño, España: Sociedad Española de Geomorfología, 1992.
- [11] S. Gavilán, “Modelado del balance hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico”, tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2019.
- [12] P. Silva et al., *Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, 2015.

- [13] R. Bhatt and A. Hossain, "Concept and Consequence of Evapotranspiration for Sustainable Crop Production in the Era of Climate Change", in *Advanced Evapotranspiration Methods and Applications*, D. Bucur, London: IntechOpen Limited, 2019, pp. 1-13.
- [14] O. Israelsen and F. West, "Water-Holding Capacity of Irrigated Soils", *UAES Bulletins*, Logan, UT, USA, Bulletin no. 183, Nov 1922.
- [15] W. Brutsaert, *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Application*. Heidelberg, Germany: Springer Netherlands, 1982.
- [16] F. Santibáñez et al., "Evapotranspiración de Referencia, Para la determinación de las demandas de riego de Chile", Centro de Agricultura y Medioambiente AGRIMED, Santiago, Chile: Universidad De Chile, 2015, pp. 8-36.
- [17] G. Senay et al. "A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields", *Sensors*, no. 7, pp. 979 – 1000, Jun 2007.
- [18] F. Padilla y R. Junconsa, "Balances Hidrológicos", en *Hidrología Superficial y Subterránea*, Departamento de Tecnología de la Construcción, Universidad de Coruña, 2013, pp.103-116. [En línea]. Disponible en: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo_7.pdf [Accedido: 07-sep-2020].
- [19] *Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur*, Uruguay: Rostlac-Unesco, 1982.
- [20] B. Zhang et al. "Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method", *Hydrological Processes*, no. 21, pp. 3635-3641, Sep 2007.
- [21] W. Zhao et al. "Uncertainty caused by resistances in evapotranspiration", *Hydrology and Earth Systems Science*. Discussion, 2019. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-2019-160>.
- [22] M. Jensen, *Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements*, New York, NY, USA: American Society of Civil Engineers, 1974.
- [23] M. Sánchez y L. Carvacho, "Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile", *Revista de Geografía Norte Grande*, no. 50, pp.171-186, 2011.
- [24] E.F. Bin Poyen et al. "Review on Different Evapotranspiration Empirical Equations", *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, Vol. 2, no. 3, pp. 2454-1311, 2016.
- [25] *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, Switzerland: World Meteorological Organization, 2008.
- [26] D. Baldocchi, "Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future", *Global Change Biology*, no. 9, pp. 479-492, Nov 2003.

- [27] A. Carrara y J.V. Chordá, "Observación sistemática del balance de C en bosques", *Seminarios sectoriales del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*, 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/ca/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/seminarioPNACC/12-balance-de-c-en-bosques_tcm34-281133.pdf [Accedido: 07-sep-2020].
- [28] "Eddy Flux Tower (EFT, Torre de Flujo)", *Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2014/12/Descripción-Torre-de-Flujo.pdf>. [Accedido: 5-jun-2020].
- [29] R. Snyder, "Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 118, no. 6, pp. 997-980, Dec 1992.
- [30] P. Sentelhas and M. Folegatti, "Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o)", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 7, no. 1, pp. 111 – 115, Abr 2003.
- [31] R. Garreaud y C. Meruane, "Instrumentos Meteorológicos y Humedad Atmosférica", en *Ciencias de la Tierra*, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Univ. De Chile, 2005, pp. 1 – 19. [En línea]. Disponible en: http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/meteo_mod1.pdf [Accedido: 07-sep-2020].
- [32] P. Gavilán and F. Castillo-Llanque, "Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment", *Agricultural water management*, vol. 96, no. 3, pp. 465-472, Mar 2009.
- [33] R. Allen et al., "Operational Estimates of Reference Evapotranspiration", *Agronomy Journal*, vol. 81, no. 4, pp. 650-662, Jul 1989.
- [34] R. Allen et al., *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*, Fairfax, VA, United States: Irrigation Association, 2005.
- [35] G. Calvo, "Estimación de la evapotranspiración a escala regional mediante teledetección satelital", trabajo de fin de Máster, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2019.
- [36] F. Alonso, "Plataformas, sensores y canales", en *Teledetección en Geografía*, Asignatura de Sistemas de información Geográfica & Teledetección, Universidad de Murcia, 2003, pp. 29 - 50. [En línea]. Disponible en: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf> [Accedido: 06-nov-2020].
- [37] A. Mehta, "Satélites, sensores y modelos de sistemas terrestres de la NASA usados para la gestión de recursos hídricos", *NASA: Fundamentals of Remote Sensing, Applied Remote Sensing Training*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/users/fundamentals/span-Session2B.pdf> [Accedido: 07-sep-2020].
- [38] S. Palacios, "Fundamentals of Aquatic Remote Sensing", *NASA: Fundamentals of Remote Sensing, Applied Remote Sensing Training*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/users/fundamentals/fundamentals-aquatic-web.pdf> [Accedido: 07-sep-2020].

- [39] R. Allen, A. Kilic, “Estimaciones de la evapotranspiración (a escala de campo) – METRIC: Panorama y aplicaciones”, Dpto. Ingeniería Civil y Recursos Naturales, Univ. De Nebraska-Lincoln, Feb. 2013.
- [40] L. Crochemore, “Evaluation of hydrological models: Expert judgement vs Numerical criteria”, Master dissertation, Pierre and Marie Curie University, France, 2011.
- [41] D. Yates et al, “ WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model Part 1: Model Characteristics”, *International Water Resources Association*, vol. 30, no. 4, pp. 487 – 500, Dec 2005.
- [42] *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. Santiago – Boston: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009.
- [43] J. Ramírez, “Modelización de Recursos Hídricos con WEAP, Uso en Cuencas Criosféricas y Revisión de Aplicaciones en Los Andes”, *Cazalac: Hidrología Andina para el manejo de los recursos hídricos: conceptos y herramientas*, [En línea]. Disponible en: https://www.cazalac.org/mwar_lac/fileadmin/imagenes2/Training_Andeandean_Hydrology/AndeanHydrology_presentations/PDF_modelo_WEAP_JRamirez.pdf [Accedido: 07-sep-2020].
- [44] J. Sieber and D. Purkey, “Water evaluation and planning system: User guide for WEAP”, *Stockholm Environment Institute – US Center*, Somerville, USA, 2015.
- [45] X. Vargas et al, “Actualización balance hídrico en Chile. metodología y desafíos de modelación”, en *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, Santiago, 2017, pp. 3-21.
- [46] D. N. Moriasi et al., “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations,” *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 50, no.3, pp. 885-900, 2007.
- [47] P. Molnar, “Calibration,” in *Watershed Modelling, SS 2011*, *Chair of Hydrology and Water Resources Management*, Zürich. Switzerland: ETH Zürich, 2011.
- [48] H. V. Gupta et al., “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling,” *Journal of Hydrology*, vol. 377, no.1, pp. 80-91, 2009.
- [49] J. Domínguez et al, “Chilean Agriculture Overview”, *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) del Ministerio de Agricultura*, Santiago, Chile, Jul 2019.
- [50] A. Hoekstra et al, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London – Washington DC, UK – USA: Earthscan Ltd, 2011
- [51] Escenarios Hídricos 2030- EH2030. (2019). *Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile*. Fundación Chile, Santiago, Chile.
- [52] Everis Chile S.A. y Infraestructura & Ecología S.A., “ Diagnóstico para desarrollar plan de riego en cuenca de Loncomilla”, Comisión Nacional de Riego, Ministerio de Agricultura de Chile, Santiago, Ene. 2017.

- [53] C. Alvarez-Garreton et al, "The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset", *Hydrology and Earth Systems Science*, vol. 22, pp. 5817 – 5846, Nov 2018.
- [54] CADE-IDPE Consultores en Ingeniería, "Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad : Cuenca del Rio Maule", Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Publicas de Chile, Santiago, Dic 2004.
- [55] Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), "Sistema de información Territorial Rural: Recursos Naturales y Proyectos, Región de Maule, Provincia de Linares, Comuna de Parral", Ministerio de Agricultura de Chile, Feb 2015.
- [56] Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), "Sistema de información Territorial Rural: Recursos Naturales y Proyectos, Región de Maule, Provincia de Linares, Comuna de Linares", Ministerio de Agricultura de Chile, Feb 2015.
- [57] J. Vargas, "Escenarios Hídricos 2030: Revisión Experta Oferta Hídrica Referencial en Chile", *Fundación Chile*, Concepción, Chile, Sep. 2017.
- [58] GCF Ingenieros Ltda., "Levantamiento de Información hidrogeológica para Modelación Cuenca del Río Maule", Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Publicas de Chile, Santiago, S.I.T. n°222, Dic. 2010.
- [59] Everis Chile S.A., "Plan Maestro de los Recursos Hídricos, Región del Maule", Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Publicas de Chile, Santiago, S.I.T. n°440, Dic. 2017.
- [60] Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE), "Disponibles Modelos Digitales de Elevación Regionales de 12.5 metros para la descarga directa", 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.ide.cl/index.php/noticias/item/1474-disponibles-modelos-digitales-de-elevacion-regionales-de-12-5-metros-para-la-descarga-directa> [Accedido: 07-sep-2020].
- [61] Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED), "Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático: Rio Perquillauquén en San Manuel", Comisión Nacional del Medio Ambiente & Ministerio de Agricultura de Chile, Dic 2008.
- [62] Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), "Sistema de Información Territorial Rural: Recursos Naturales y Proyectos, Región de Ñuble, Provincia de Punilla, Comuna de San Fabian", Ministerio de Agricultura de Chile, Feb 2015.
- [63] D. Legates and G. McCabe, "Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation", *Water Resources Research*, Vol. 35, no. 1, pp. 233-241, Jan 1999.
- [64] J. McPhee et al., "Selección y Aplicación de un Modelo Hidrológico para Estimar los Impactos del Cambio Climático en la Generación de Energía del Sistema Interconectado Central", Departamento de Ingeniería Civil, Univ. De Chile, Ministerio de Energía de Chile, Informe Preliminar (III), Jun. 2011.

- [65] R. Garreaud, "Estabilidad Atmosférica", en *Introducción a la Meteorología y Oceanografía*, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Univ. De Chile, 2005.
- [66] U.S. Geological Survey, "Preliminary Assessment of the Value of Landsat 7 ETM+ Data following Scan Line Corrector Malfunction", Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, Jul. 2003.
- [67] N. Riu and V. Settepani, "Six Years Poplar Response to Different irrigation regimes", *Rev. Facultad de Ciencias Agrarias, Univ. Nacional de Cuyo*, Vol. 36, no. 1, pp. 63-68, Mar. 2004.
- [68] S. Besteiro, "Evaluación de la Influencia Hidrológica de Forestaciones en la Llanura Pampeana", Tesis Doctoral, Univ. Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2014.
- [69] R. B. Stull, *Meteorology for Scientists and Engineers*, Belmont, CA, USA: Brooks/Cole, 2000.
- [70] R. Allen, R. Waters and W. Bastiaanssen, "Surface Energy Balance Algorithms for Land: Advanced Training and User Manual", *NASA EOSDIS/Synergy*, Idaho, USA, 2002.
- [71] A. Benítez, "Taller de Hidrología aplicada a la resolución de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales", Dirección General de Agua, Ministerio de Obras Publicas de Chile, Santiago, Chile, Ene 1998.
- [72] M. Pidwirny and S. Jones, "Actual and Potential Evapotranspiration" in *Fundamentals of Physical Geography*. Kelowna, BC, Canadá: Univ. of British Columbia Okanagan, 2006 [Online]. Available: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/chapter8.html>. [Accessed: Nov 30, 2020]
- [73] M. Iruthayaraj and B. Morachan, "Relationship between Evaporation from different Evaporimeters and Meteorological Parameters", *Agricultural Meteorology*, Vol. 19, no. 1, pp. 93-100, Aug 1977.
- [74] H. Penman, D. Angus and C. Van Bavel, "Microclimatic Factors Affecting Evaporation and Transpiration" in *Irrigation of Agricultural Lands*, Madison, WI: American Society of Agronomy, Inc., 1967, pp. 483-505.
- [75] M. Mira et al, "Análisis Comparativo de Métodos para la Estimación de la Emisividad en la Banda Térmica del Sensor TM de landsat-5", *GeoFocus*, Vol. 1, no. 19, pp. 55-80, Feb. 2017.
- [76] H. Gupta, S. Sorooshian and P. Yapo, "Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration", *J. of Hydrologic Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 135-143, Apr 1999.
- [77] M. L. Scaff, "Interpretación Hidro-Meteorológica de los Gradientes Orográficos de Precipitación en el Valle del Elqui", trabajo de fin de grado, Univ. De Chile, Santiago, Chile, 2012.
- [78] M. Hrachowitz and M. Weiler, "Uncertainty of Precipitation Estimates Caused by Sparse Gauging Networks in a Small, Mountainous Watershed", *J. of Hydrologic Engineering*, vol. 16, no. 5, pp. 460-471, 2011.

- [79] Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile, “Actualización del Balance Hídrico Nacional”, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas de Chile, Santiago, S.I.T. n°417, Oct. 2017.
- [80] G. Stanhill, “Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements?”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 12, no. 1, pp. 233-236, Aug 2002.
- [81] W. Pelton and H. Korven, “Evapotranspiration Estimates from Atmometers and Pans”, *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 49, no. 1, pp. 615-621, Sep 1969.
- [82] D. Maidment, *Handbook of Hydrology*. Austin, TX, USA: McGraw-Hill, 1993.
- [83] T. McMahon et al, “Estimating Actual, Potential, Reference Crop and Pan Evaporation Using Standard Meteorological Data: A Pragmatic Synthesis”, *Hydrology and Earth System Science*, vol. 17, no. 1, pp. 1331-1363, Apr 2013.
- [84] A. Mokhtari, H. Noory and M. Vazifedoust, “Performance of Different Surface Incoming Solar Radiation Models and Their Impacts on Reference Evapotranspiration”, *Water Resources Management*, vol. 32, no. 9, pp. 3053-3070, Apr 2018.
- [85] B. Bakhtiari and A. Liaghat, “Seasonal Sensitivity Analysis for Climatic Variables of ASCE – Penman – Monteith Model in a Semi-arid Climate”, *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 1135-1145, Dec 2011.
- [86] H. Tabari and P. Talaei, “Sensitivity of Evapotranspiration to Climatic Change in Different Climates”, *Global and Planetary Change*, vol. 115, no. 1, pp. 16-23, Jan 2014.
- [87] C. Du et al, “Reference Evapotranspiration Changes: Sensitivities to and Contributions of Meteorological Factors in the Heihe River Basin of Northwestern China (1961–2014)”, *Advances in Meteorology*, vol. 2016, Dec. 2015.
- [88] F. Morton, “Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and Their Significance to the Science and Practice of Hydrology”, *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 66, no. 1, pp. 1-76, 1983.
- [89] G. Hargreaves, “Accuracy of Estimated Reference Crop Evapotranspiration”, *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 115, no. 6, pp. 1000-1007, Dec 1989.
- [90] G. Senay et al, “Estimating Basin Scale Evapotranspiration (ET) by Water Balance and Remote Sensing Methods”, *Hydrological Processes*, vol. 25, no. 1, pp. 4037-4049, Dec 2011.
- [91] M. Billah et al, “A Methodology for Evaluating Evapotranspiration Estimates at the Watershed-Scale using GRACE”, *J. of Hydrology*, vol. 523, no. 1, pp. 574-586, Feb 2015.
- [92] S. Dhungel and M. Barber, “Estimating Calibration Variability in Evapotranspiration Derived from a Satellite-Based Energy Balance Model”, *Remote Sensing*, vol. 10, no. 165, 2018.
- [93] G. Yin, G. Mariethoz and M. McCabe, “Gap-Filling of Landsat 7 Imagery Using the Direct Sampling Method”, *Remote Sensing*, vol. 9, no. 12, Jan 2017.

Anexo 1: Derechos de agua

Tabla Anexo 1.1 – Derechos de agua otorgados, cuenca estero Curipeumo en lo Hernández.

N°	Propietario	Tipo de Derecho	Asignación Temporal	Fuente	Caudal Anual Concedido [lt/s]
1	Regina Hernández de Varela	Consuntivo	Eventual - Continuo	Subterránea	120,00
2	Michel Jiménez Obreque	Consuntivo	Eventual - Continuo	Subterránea	30,00
3	Sociedad Agrícola Fátima Ltda.	Consuntivo	Eventual - Continuo	Subterránea	120,00
4	Viña Portal del Alto S.A.	Consuntivo	Eventual - Continuo	Subterránea	20,00
5	Sociedad Agrícola Fátima Ltda.	Consuntivo	Eventual - Discontinuo	Subterránea	33,33
6	Carlos Cancino Niño	Consuntivo	Eventual - Discontinuo	Subterránea	1,67
7	Sociedad Agrícola Fátima Ltda.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	80,00
8	Sociedad Agrícola Fátima Ltda.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	49,00
9	Sociedad Agrícola Fátima Ltda.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	100,00
10	Sociedad Agrícola Fátima Ltda.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	102,00
11	Jaime Fuentes Fernández	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	95,00
12	Sociedad Agrícola Fátima Ltda.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	70,00
13	Soc. Agrícola El Prado Ltda.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	65,00
14	Frutícola José Soler S.A.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	70,00
15	Miguel Gutiérrez Cáceres	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	3,90
16	Carmen Escobar Escobar	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	4,00
17	Germán Muñoz Quiroz	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	71,00
18	Ramon Hernández Miranda	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	28,00
19	Berta Luco Montero y Otros.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	25,00
20	Adela Albornoz Hurtado	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	4,9
21	José Domínguez González	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	17,00
22	Carlos Concha Concha	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	5,90
23	Ismael Espinoza Soto	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	8,00
24	Soc. Agrícola Trigales Spa.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	60,00
25	Copihue Spa.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	92,00
26	Juan Carrasco Garrido	Consuntivo	Permanente - Continuo	Subterránea	14,6
27	Emilio Arellano Aravena & Otros	Consuntivo	Permanente - Discontinuo	Subterránea	73,33

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Anexo 1.2 – Derechos de agua otorgados, cuenca río Perquilauquén en San Manuel.

N°	Propietario	Tipo de Derecho	Asignación Temporal	Fuente	Caudal Anual Concedido [lt/s]
1	Soc. Agr. Del Carmen Ltda.	Consuntivo	Permanente - Continuo	Superficial	190,00
2	Fisco, D.O.H.	Consuntivo	Permanente - Discontinuo	Superficial	6425,00
3	Helmut Seelbach Ewig	Consuntivo	Eventual - Continuo	Superficial	70,00
4	Rudolf Collen Franzkowsky	Consuntivo	Eventual - Discontinuo	Superficial	39,17
5	Fisco, D.O.H.	Consuntivo	Eventual - Discontinuo	Superficial	140,81
6	Eléc. Perquilauquén SPA.	No Consuntivo	Permanente - Continuo	Superficial	10968,58
7	Swiss Hydro S.A.	No Consuntivo	Permanente - Continuo	Superficial	8653,82
8	Eléc. Perquilauquén SPA.	No Consuntivo	Permanente - Discontinuo	Superficial	7002,75
9	Eléc. Perquilauquén SPA.	No Consuntivo	Eventual - Continuo	Superficial	10100,66
10	Inverlectric Baviera Ltda.	No Consuntivo	Eventual - Continuo	Superficial	5000,00
11	Marco Parra Fierro	No Consuntivo	Eventual - Continuo	Superficial	3500,00
12	Swiss Hydro S.A.	No Consuntivo	Eventual - Continuo	Superficial	11600,40

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 1: Acuíferos de la cuenca Río Maule

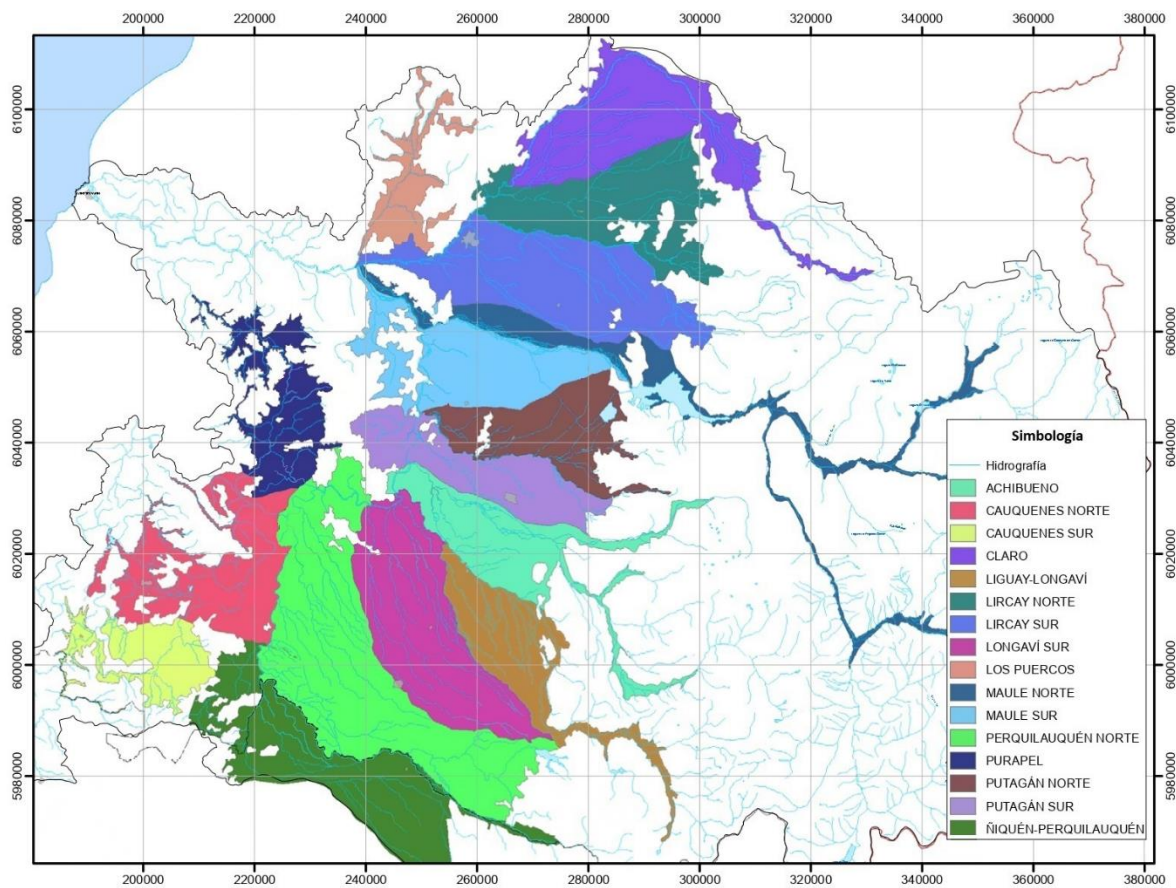


Figura Apéndice 1.0 – Ilustración de acuíferos de la cuenca río Maule.
Fuente: Adaptado de [58].