

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr. Álvaro Suazo Schwencke

**ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN
LAS REGIONES DEL BÍO-BÍO Y DE LA
ARAUCANÍA**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el

Título de Ingeniero Civil

FELIPE NAVARRETE CÁNOVAS

Concepción, Marzo del 2016

Estimación de la evapotranspiración en las regiones del Biobío y de la Araucanía

Autor: Felipe Navarrete Cánovas

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: fenavar@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Dr. Álvaro Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

Este proyecto de título ha sido desarrollado con el fin de proveer información relevante sobre evapotranspiración potencial para su uso en los balances hídricos que se puedan generar para utilizarlos en el desarrollo de la agricultura de Chile.

Dicha información de evapotranspiración potencial ha sido obtenida mediante el uso de la ecuación propuesta por Hargreaves – Samani (1985), la cual se adapta de mejor manera al contexto de Chile, país que no cuenta con un número de estaciones significativas que aporten los datos recomendados para obtener la evapotranspiración potencial. Los datos requeridos por la ecuación son de fácil acceso, de manera pública mediante la Dirección General de Aguas.

Para cumplir con los objetivos propuestos, se utilizaron variados procedimientos que finalmente arrojaron el valor esperado de evapotranspiración potencial por estación, en los meses cálidos y fríos definidos.

Finalmente con dichos valores fue posible realizar diversas comparaciones con factores como, altitud, latitud y longitud, siendo el primero el que presenta un mayor grado de influencia dentro de los resultados, especialmente en las épocas frías. También fue posible utilizar los valores calculados por estación para generar mapas de isolíneas de evapotranspiración representativas de los meses cálidos y fríos.

Palabras clave: Evapotranspiración potencial, radiación solar, temperatura, altura.

Nº de Palabras : 6.820

Nº de Tablas / Figuras: 8 / 5

Estimation of evapotranspiration in regions of Biobio and Araucania

Author: Felipe Navarrete Cánovas

Department of Civil Environmental Engineering, University of Bío-Bío

Email: fenavar@alumnos.ubiobio.cl

Professor Sponsor: Dr. Álvaro Suazo Shwencke

Department of Civil Environmental Engineering, University of Bío-Bío

Email: asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

This project title has been developed in order to provide relevant information on potential evapotranspiration for use in water balances that can be generated, and thus, use in the development of agriculture in Chile.

Such information of potential evapotranspiration was obtained by using the equation proposed by Hargreaves - Samani (1985), which adapts better to the context of Chile, a country that does not have a number of significant stations that provide data Recommended for potential evapotranspiration. The data required by the equation are easily accessible, published by the General Water Directorate.

To meet the objectives, various procedures that ultimately yielded the expected value of potential evapotranspiration per season, in warm and cold months set they were used.

Finally with these values were possible comparisons with factors as altitude, latitude and longitude, being the first the one that presents greater degree of influence within the results, especially in cold weather. It was also possible to use the values calculated by station to generate maps of isolines of representative evapotranspiration warm and cold months.

Keywords: Potential evapotranspiration, solar radiation, temperature, height.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TÍTULO	6
1.2. OBJETIVOS.....	7
2. CONCEPTOS.....	8
2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN (<i>ET</i>)	8
2.2. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	9
2.3. ECUACION DE HARGREAVES – SAMANI (1985).....	10
3. METODOLOGÍA	13
3.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS.....	13
3.2. RECOPIACIÓN DE MATERIAL	13
3.3. ORGANIZACIÓN DE DATOS	17
3.4 REVISIÓN DE DATOS.....	17
3.5. PROCESO DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	17
3.6. ANÁLISIS DE PROBABILIDADES	18
3.7. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN:	18
3.8. GENERACIÓN DE CURVAS DE ISOLÍNEAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	19
4. RESULTADOS	20
4.1. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL DIARIA Y MENSUAL.....	20
4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Y ALTURA:.....	22
4.4. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL Y LATITUD	23
4.5. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL Y LONGITUD.....	24
4.6. MAPAS DE ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EN LAS REGIONES DEL BIOBÍO Y DE LA ARAUCANÍA.	25
4.7 FUNCIONES DE PROBABILIDAD.....	27
5. CONCLUSIONES.....	28
5.1. CONCLUSIONES.....	29
5.2. RECOMENDACIONES Y COMENTARIOS.....	29
6. BIBLIOGRAFÍA:.....	30

ANEXO TABLAS:	33
A. TABLAS DE APOYO	33
B. TABLAS DE RESULTADOS	34
ANEXO ECUACIONES	40
C. ECUACIONES DE FUNSIONES DE PROBABILIDAD ANALIZADAS	40

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población, la industrialización y los constantes cambios en las economías globales han hecho que la explotación de recursos naturales durante el siglo XX y principio del siglo XXI vaya en un aumento vertiginoso. Uno de estos recursos afectados ha sido el agua.

A pesar de que el agua es un componente importante del planeta, el porcentaje utilizable de agua dulce corresponde a una cantidad ínfima, muy inferior al 0.01% sobre el total que existe (UNEP, 2003). Bajo este contexto y en busca de afrontar las futuras dificultades relacionadas con el uso del agua, la comunidad internacional llegó a una declaración de la cual se extraen dos ideas principales, primero se reconoce al agua como un recurso finito, en peligro y esencial para la vida, y segundo, en vista de lo primero, el agua debe ser administrada de forma responsable involucrando en la planificación de ésta a todos los niveles que se ven relacionados con su uso (ONU, 1992).

Una de las actividades que ocupan un importante porcentaje de agua dulce, es la agricultura de regadío. Bajo esta perspectiva, Chile está conectado de forma explícita en el uso de este recurso. El sector silvoagropecuario ocupa un lugar destacado y está en una fase de desarrollo muy potente. De esta manera, se necesitan importantes volúmenes de agua que permitan el desarrollo de las más de 4.000.000 de hectáreas que se encuentran cultivadas (ODEPA, 2015), lo que supone por lo tanto, que debe existir un correcto y detallado uso del agua por medio de la cuantificación del balance hídrico, balance que requiere dentro de sus partes el cálculo de la evapotranspiración.

Es por esto, que la finalidad de este proyecto es realizar un aporte a la cuantificación del balance por medio de calcular los valores de evapotranspiración potencial correspondientes a la Región del Biobío y de la Araucanía, regiones de importante uso silvoagropecuario, y con presencia de grandes masas de agua. Dichos datos serán obtenidos a partir de temperaturas registradas en las estaciones de la DGA, y utilizando la fórmula de Hargreaves - Samani (1985), lograr construir mapas de isolíneas de evapotranspiración potencial representativos de los meses con mayor y menor temperatura.

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TÍTULO

Para poder administrar de forma responsable y eficaz los recursos hídricos disponibles es necesario realizar un balance hídrico detallado, para lo cual se necesita cuantificar las variables que están en movimiento dentro del ciclo. Uno de estos factores, el cual devuelve en promedio el 70% del agua a la atmósfera es la evapotranspiración.

En Chile los datos más recientes de evapotranspiración datan de mediados de los años ochenta (DGA, 1988). En dicha época se encontraban limitaciones importantes para el correcto registro de los datos, como por ejemplo el número de estaciones disponibles, muy por debajo de las que existen actualmente, así como la tecnología de la época que no entregaba la confiabilidad ni exactitud actual. Es por esto que es necesario realizar un nuevo proceso de cálculo de los datos de evapotranspiración potencial.

Las regiones que este proyecto abarca son las Regiones del Biobío y de la Araucanía, las cuales son regiones estratégicas en la economía chilena, teniendo un grado de influencia enorme del punto de vista silvoagropecuario.

En la tabla n°1 se observan los tres principales tipos de cultivos chilenos, con el correspondiente porcentaje del total que ocupa cada región en referencia a las hectáreas cultivadas por sector. Como se puede apreciar, ambas regiones ocupan un lugar preponderante en la cantidad de hectáreas utilizadas para cultivos de los tres rubros principales del sector silvoagropecuario.

Tabla n°1. Porcentaje de hectáreas cultivadas en la Región del Biobío y de la Araucanía con respecto al total nacional por cultivo.

TIPO DE CULTIVO	REGION DEL BIOBIO	REGION DE LA ARAUCANIA
Forestal	36%	21.8%
Cereal	23.6%	35.3%
Forraje	14.7%	17.5%

Ficha Nacional, ODEPA. Actualización 2015

Por lo tanto en este proyecto de título se busca estimar la evapotranspiración potencial para las regiones ya mencionadas, de una forma de fácil acceso para su uso posterior, así como también hace uso de la fórmula de Hargreaves - Samani (1985), la cual se ajusta de mejor manera a los datos de los cuales se puede acceder en las estaciones meteorológicas de Chile.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Estimar la distribución de la Evapotranspiración Potencial en las regiones del Biobío y de la Araucanía a partir de registros de temperatura.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estructurar datos de temperatura provenientes de la DGA.
- Organizar los valores de evapotranspiración potencial de la región del BioBío y de la Araucanía.
- Generar curvas de isolíneas representativas de los meses con mayor y menor evapotranspiración potencial.
- Analizar el efecto de latitud, longitud y altitud en la evapotranspiración potencial.

2. CONCEPTOS

A continuación se explican los conceptos claves para comprender la metodología aplicada, pasando por aquellos que hacen referencia directa a la evapotranspiración como también aquellos que están implícitos dentro de su cálculo.

2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET)

Es un proceso conjunto que está presente dentro del Ciclo Hidrológico. Agrupa principalmente dos procesos muy difíciles de cuantificar de manera separada. Estos son:

- **Evaporación:**

Fenómeno físico por el cual un líquido es capaz de convertirse en vapor, y por lo tanto incorporarse a la atmosfera. Para producir el cambio de estado de las moléculas de agua de líquido a vapor se necesita energía, la cual es entregada de forma directa por la radiación solar y en menor grado por la temperatura ambiente del aire. Para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante se necesita una fuerza, la cual corresponde a la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmosfera. Por lo tanto para producir evaporación de manera constante es necesario retirar dicho vapor de agua, y es ahí donde el viento empieza a participar del proceso.

- **Transpiración:**

Proceso fisiológico mediante el cual el agua que se encuentra en la vegetación y se encuentra entre sus tejidos (principalmente estomas) es vaporizada hacia la atmosfera. Los mismos factores incidentes en la evaporación son determinantes para la transpiración, estos son: radiación solar, temperatura del aire, humedad atmosférica y el viento.

Otro factor influyente dentro de la evapotranspiración es la intercepción, la cual también se produce cuando la cobertura vegetal u otras coberturas como la de los techos de las casas, retienen agua de lluvia para luego ser evaporada por lo que se le agrupa dentro de la evaporación.

Como la importancia dentro del ciclo hidrológico radica en el total de agua que es evaporada a la atmosfera es que se considera como un solo proceso.

Los factores que influyen en la evapotranspiración son variados dependiendo de la cobertura del lugar, ya sea una lámina de agua intervendrá la salinidad del agua y su temperatura, en el suelo desnudo intervendrá el tipo de suelo, su grado de humedad,

etc. Sin embargo todos los tipos de cobertura dependen también del poder evaporante de la atmosfera el cual, como se mencionó en la evaporación, está determinada por los factores de radiación solar, temperatura ambiente, humedad atmosférica, viento. Muchos de estos factores son difíciles de registrar para realizar, por medio de algún método, el cálculo de la evapotranspiración (Jensen et al., 1990).

2.1.1. Evapotranspiración Real

Es la evapotranspiración que es producida de manera particular por cada lugar en estudio, siendo evaluada bajo las condiciones reales en las que se encuentra la zona.

2.1.2. Evapotranspiración Potencial (ET_0)

Es la evapotranspiración que se espera cuando las condiciones tanto de la cobertura vegetal como de humedad del suelo se encuentran óptimas, es decir la ET que se produciría sin restricciones de agua en un campo de gramíneas de 12 cm de altura, y con determinadas condiciones aerodinámicas y de albedo. La evapotranspiración potencial es utilizada para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmosfera independiente del tipo de suelo y su cobertura y de las prácticas de manejo de suelo o cultivo. Esto permite realizar comparaciones de distintos sectores no importando su tipo de cobertura (Doreenbos y Pruit; 1977; Allen et al., 1998).

2.2. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Como ya se analizó en el punto anterior, la evapotranspiración potencial al usar como referencia una cobertura tipo, los factores que la determinan son netamente del tipo meteorológico.

Desde este punto de vista, el único método recomendado es el método FAO Penman-Monteith, que incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Sin embargo el problema que este método genera, es que requiere de una gran cantidad de información de diversa índole climática, información que no siempre está disponible en todas las estaciones meteorológicas o al menos no en las suficientes como para realizar un cálculo significativo de una región en estudio. En Chile la información de que

se dispone es muy acotada, siendo las temperaturas máximas y mínimas las más comunes encontrar en una estación meteorológica. Es por esto que se utilizará la ecuación de cálculo de evapotranspiración potencial propuesta por Hargreaves – Samani (1985), que dentro de los datos requeridos, el que presenta mayor complejidad es el de temperaturas medias, máximas y mínimas (FAO 56, 2006).

2.3. ECUACION DE HARGREAVES – SAMANI (1985)

Corresponde a una ecuación desarrollada en conjunto, por medio de la investigación de Hargreaves y Samani, por la cual, con los mínimos datos de una estación meteorológica, como lo son las temperaturas máximas y mínimas, y la ubicación geográfica de la estación, lo que facilita obtener datos tabulados de radiación solar y zona característica, se logra obtener un valor de evapotranspiración potencial (Hargreaves – Samani, 1985).

La elección en particular de esta ecuación es debido a la cantidad de información que pueden entregar las estaciones meteorológicas de la DGA en Chile, las cuales están acotadas principalmente a temperaturas de valores diarios extremos, y temperaturas medias de tipo sinópticas. Este último dato, tampoco es posible encontrarlo en todas las estaciones en estudio, por lo que ante la precariedad de los datos posibles, la ecuación de Hargreaves – Samani (1985) es la que mejor ajusta sus requerimientos a los disponibles. Además de lo anterior, se puede destacar que esta ecuación al ser comparada con la ecuación recomendada del método FAO Penman-Monteith presentó diferencias poco significativas en sus valores de evapotranspiración potencial (FAO 56, 2006).

La ecuación de Hargreaves – Samani (1985) corresponde a:

$$ET_0 = 0,0135 (t_{med} + 17,78)R_s$$

Dónde: ET_0 = Evapotranspiración Potencial diaria (mm/día)

t_{med} = temperatura media (°C)

R_s = Radiación Solar Incidente

2.3.1. Radiación Solar

Conjunto de energías electromagnéticas que proviene del Sol y que se producen por distintos procesos de fusión del hidrógeno contenido en él. Una de estas radiaciones es la radiación infrarroja, la cual es la causante de la agitación de las moléculas y por lo tanto el aumento de las temperaturas, proceso que provoca en gran medida la evapotranspiración.

2.3.1.1. Radiación Solar Incidente (R_s)

Es la radiación solar que llega al suelo, luego del paso de ésta por la atmosfera. Para el presente proyecto, su cálculo se hará basado en la fórmula propuesta por Samani (2000), que es:

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0,5}$$

Dónde: R_s = Radiación Solar Incidente

R_0 = Radiación Solar extraterrestre

KT = Coeficiente

t_{max} = temperatura diaria máxima

t_{min} = temperatura mínima máxima

2.3.1.2. Radiación Solar Extraterrestre (R_o)

Corresponde a la radiación solar que llega al exterior de la atmosfera. Para evaluar su valor existen múltiples tablas, las cuales dan un valor en referencia tanto a latitud como a mes del año a evaluar. Para el presente proyecto de título se hará uso de la tabla de Allen et al. (1998). Los valores tabulados se encuentran en $MJulio/m^2/día$. Para pasar a $mm/día$ se debe multiplicar R_o por $\frac{238,85}{597,3-0,57t_{media}}$, siendo t_{media} la temperatura media del periodo.

2.3.2. Coeficiente (KT)

Corresponde a un coeficiente de tipo empírico, calculado de datos de presión atmosférica. Según la recomendación de Hargreaves – Samani (1985), dichos valores quedan tabulados en la tabla n°2:

Tabla n°2: Valores del coeficiente KT para uso en el cálculo de la radiación solar incidente.

Tipo de región	Valor coeficiente KT
Interior	0,162
Costa	0,190

Fuente: Elaboración propia

3. METODOLOGÍA

Se explican los procesos necesarios para desarrollar el tema de proyecto de título y conseguir llegar tanto al objetivo principal como a los secundarios.

3.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Al observar la ecuación de Hargreaves – Samani (1985) y la ecuación de Radiación Solar incidente (Samani, 2000), los datos de los que se debe disponer son:

- Temperatura mínima diaria
- Temperatura máxima diaria
- Temperatura media diaria
- Valores de Radiación Solar Extraterrestre
- Valores de Radiación Solar Incidente
- Valores del Coeficiente KT

Es importante señalar que uno de los objetivos de este proyecto, es generar mapas de isolinéas de ET_0 para representar los periodos máximos y mínimos de éste. Para ello, serán utilizados tanto los periodos de meses de altas temperaturas (Diciembre, Enero, Febrero) y de baja temperatura (Junio, Julio, Agosto).

3.2. RECOPIACIÓN DE MATERIAL

La idea de usar la fórmula de Hargreaves – Samani (1985), se apoya principalmente en la disponibilidad de los datos necesarios para su aplicación, los cuales son ampliamente difundidos (Datos de temperatura).

Datos meteorológicos es posible obtenerlos directamente de la página web de la Dirección General de Aguas (DGA), en su Información Oficial Hidrometeorológica, desde la cual se puede acceder a las distintas estaciones repartidas a lo largo de Chile (para efecto de este proyecto solo se abocará a las regiones del Biobío y de la Araucanía), y en donde se encuentran tanto las temperaturas diarias extremas, así también los valores de temperatura media diaria de valores sinópticas.

La radiación solar incidente, depende del coeficiente KT , el cual adquiere un valor dependiendo de su ubicación geográfica cercana al interior o a la costa, y de la radiación solar extraterrestre, cuyos valores se relacionan con la latitud y el mes (Hargraves – Samani, 1985).

El valor de la radiación solar incidente queda, por lo tanto, directamente relacionada con su ubicación geográfica y el mes en que es analizado (Samani, 2000).

3.2.1. Estaciones meteorológicas

De las estaciones meteorológicas totales en la región del Biobío y de la Araucanía, no todas poseen datos de temperatura pertinentes para este proyecto de título. En la tabla n°3 se muestran las estaciones usadas en este proyecto.

Tabla n°3: Cantidad total de estaciones por región y cantidad de estaciones con datos utilizables.

Región	Estaciones totales	Estaciones utilizables
Biobío	16	9
Araucanía	25	20
Totales	41	29

Fuente: Elaboración propia

La ubicación geográfica y altitud de las estaciones quedan reflejados en la tabla n°4. Dichos datos permiten además conocer información tabulada, como el dato de latitud, así como también si corresponde a una zona costera o de interior.

Tabla n°4: Estaciones meteorológicas empleadas en el estudio.

Región	Provincia	Estación	Latitud	Longitud	Altura (m)
Biobío	Arauco	Contulmo	38° 01' 07"	73° 13' 48"	41
	Arauco	Nahuelbuta	37° 49' 24"	72° 57' 38"	1177
	Biobío	Alto Mallines	37° 09' 32"	71° 14' 33"	1770
	Biobío	Quilaco	37° 41' 06"	72° 00' 21"	231
	Biobío	Rio Biobío en Llanquén	38° 12' 03"	71° 17' 56"	767
	Ñuble	Caracol	36° 39' 04"	71° 23' 42"	610
	Ñuble	Coihueco Embalse	36° 38' 27"	71° 47' 56"	314
	Ñuble	Diguillín	36° 52' 07"	71° 38' 33"	670
	Ñuble	La Punilla	36° 39' 30"	71° 19' 40"	840
Araucanía	Cautín	Cherquenco	38° 41' 02"	72° 00' 00"	500
	Cautín	Cunco	38° 55' 37"	72° 00' 45"	380
	Cautín	Lautaro	38° 31' 07"	72° 27' 08"	200
	Cautín	Ojos del Caburga	39° 14' 12"	71° 50' 08"	300
	Cautín	Pucón	39° 16' 31"	71° 57' 01"	230
	Cautín	Pueblo Nuevo	38° 42' 46"	72° 33' 21"	119
	Cautín	Puerto Saavedra	38° 47' 19"	73° 23' 37"	5
	Cautín	Puesco (Aduana)	39° 31' 09"	71° 32' 52"	620
	Cautín	Temuco Centro	38° 44' 33"	72° 35' 24"	122
	Cautín	Teodoro Schmitd	39° 01' 40"	73° 04' 41"	13
	Cautín	Tricauco	38° 51' 02"	71° 33' 00"	520
	Malleco	Angol	37° 46' 46"	72° 38' 14"	113
	Malleco	Collipulli	37° 57' 30"	72° 25' 32"	240
	Malleco	Ercilla	38° 02' 39"	72° 27' 40"	262
	Malleco	Laguna Malleco	38° 12' 56"	71° 48' 38"	894
	Malleco	Licura	38° 39' 06"	71° 05' 31"	1093
	Malleco	Lonquimay	38° 27' 13"	71° 22' 27"	931
	Malleco	Malalcahuello	38° 28' 13"	71° 34' 31"	950
	Malleco	Manzanar	38° 27' 47"	71° 41' 57"	790
	Malleco	Traiguén	38° 15' 22"	72° 39' 13"	234

Fuente: DGA

3.2.2. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos mencionados en los requerimientos es posible encontrarlos en las estaciones meteorológicas de la DGA. Los valores a usar serán los de temperaturas diarias extremas, los cuales serán utilizados para los periodos de meses de altas temperaturas (01 de Diciembre – 28/29 de Febrero) y los periodos de meses de bajas temperaturas (01 de Junio – 31 de Agosto).

Respecto a la temperatura media diaria, las estaciones entregan valores de tipo sinóptico, es decir se obtiene un promedio de varias mediciones tomadas en periodos regulares de tiempo durante el día. Sin embargo dichas temperaturas medias de valores sinópticos no es posible encontrarlas en la totalidad de las estaciones, por lo que luego de hacer una comparación previa de valores de evapotranspiración, se encontró que las diferencias de dichas temperaturas con temperaturas medias calculadas de máximos y mínimos no presentan diferencias en los resultados superiores al 3%. Así para el cálculo de las temperaturas medias diarias se procedió a promediar los datos de temperaturas diarias extremas.

3.2.3. Datos de Radiación solar

La ubicación geográfica de las estaciones utilizadas comprende aproximadamente desde la latitud 36° a la 39°, por lo que según la tabla de Allen et al. (1998), los valores de radiación solar pertinentes a este proyecto de título son los mostrados en la tabla n°5.

Tabla n°5: Valores de radiación, en MJulio/m²/día, por latitud y mes de estudio.

LATITUD	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
36	44.4	43.4	38.9	15.1	16.2	21.2
38	44.5	43.4	38.5	13.9	15.1	20.2
39	44.6	43.4	38.1	12.8	13.9	19.1

Fuente: Extracto de Allen et al. (1998)

3.3. ORGANIZACIÓN DE DATOS

Una vez recopilados todos los datos pertinentes se procederá a ordenar cada uno de ellos para que de forma ordenada y clara sea posible realizar el cálculo de la ET_0 . Serán clasificados primeramente por región, luego por provincia para posteriormente agruparlos por estación. Mediante el uso del programa Microsoft Excel (2013), se generaran archivos por estación que permitirán agrupar los datos de una manera amigable para su posterior uso.

3.4 REVISIÓN DE DATOS

Con el fin de evitar cualquier tipo de error en los procesos de cálculo, se procede a hacer una observación minuciosa de los datos de temperatura que puedan generar errores, como lo serían valores mínimos y máximos cambiados de ubicación, valores máximos y mínimos iguales, por lo que se los datos que tengan estas características no serán empleados en este estudio.

3.5. PROCESO DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Con los datos ya tabulados de manera ordenada, es posible, mediante el uso de Microsoft Excel, asociar los datos con la fórmula de cálculo de la ET_0 mediante la fórmula de Hargreaves – Samani (1985). De esta manera, con las unidades de medida adecuadas, se espera obtener la ET_0 en mm/día, para cada estación de las regiones estudiadas, en un promedio mensual, para los meses de épocas cálidas y frías.

3.6. ANÁLISIS DE PROBABILIDADES

3.6.1. Análisis de Frecuencias

Con el fin de predecir, a partir de la información histórica de ET_0 , el comportamiento futuro de sus valores en las distintas estaciones en la cual fueron tomadas las muestras de temperatura, se hará uso de los análisis de frecuencias. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Para esto se hará uso del método analítico. Este método consiste en asumir que la serie de datos puede ser ajustada a través de una función de densidad de probabilidades (FDP) conocida (Ven Te Chow, 1994). Las FDP a utilizar en este proyecto de título son:

- **Distribución Normal**
- **Distribución LogNormal**
- **Distribución tipo Gumbel**

3.6.2. Pruebas de Bondad de Ajuste

Se han propuesto pruebas estadísticas para determinar que tan adecuado es el ajuste de los datos a una FDP. Estas pruebas son necesarias para rechazar o aceptar una función de probabilidad con cierto nivel de confianza. La bondad del ajuste de una FDP puede estimarse al comparar los valores teóricos con los muestrales de las funciones de frecuencia relativa o de frecuencia acumulada.

Para el presente proyecto de título se utilizará la prueba de Kolmogorov – Smirnov, ya que este test es aplicable de forma correcta entre muestras de tipo continuo con gran cantidad de datos como en muestras más reducidas, esta característica la hace ideal para la realidad de las estaciones meteorológicas de Chile, ya que algunas estaciones datan de más de cincuenta años y otras más nuevas, menos de diez años. Se trabajará con un nivel de confiabilidad del noventa y cinco por ciento.

3.7. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN:

Con el fin de realizar comparaciones de ET_0 con las variables de altura, latitud y longitud, se utiliza este coeficiente el cual resulta del cociente entre la covarianza y las desviaciones de cada muestra.

El coeficiente de correlación lineal es un número comprendido entre el número uno y el número uno negativo. Dependiendo de la cercanía a cada número se puede decir que la correlación es directa y fuerte si se aproxima a uno, e inversa y fuerte si se aproxima a uno negativo. Además de esto si el valor es cercano a cero se considera una relación débil.

3.8. GENERACIÓN DE CURVAS DE ISOLÍNEAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Para lograr este objetivo se ocupan los siguientes pasos:

- Obtener un modelo digital de terreno (DEM ASTER), por medio de los programas pertinentes, para identificar las curvas de nivel del área en estudio, que ha sido delimitado (regiones del Biobío y de la Araucanía).
- Utilizando programas como AutoCAD o ArcGis, se georreferencia el espacio analizado, y se procede a ubicar en él, las estaciones meteorológicas a utilizar.
- A cada estación se le asigna un valor de evapotranspiración potencial (en el eje z).
- Se crea una superficie que permita unir las estaciones, interpolando entre puntos, de manera tal que se puedan crear curvas de isolíneas que entreguen valores para cada localidad y que sean fáciles de leer.
- Las curvas de nivel son suavizadas por medio de las cotas de terreno, considerando el factor de la altitud el más significativo en influencia con la evapotranspiración potencial.

Con el fin de abarcar lo más posible el área, es que se utilizarán estaciones de regiones cercanas para cubrir los espacios faltantes con isolíneas.

Debido a la ausencia de estaciones con datos en la zona costera de Concepción y la zona cercana a la región del Maule, es que se realizara una extrapolación, obteniendo una función lineal con los valores de ET_0 cercanos a la costa y su altura, y una corrección de radiación por el cambio de latitud, que será un aumento del 2% para meses cálidos y 8% para el invierno en la ET_0 , obtenido de análisis empíricos.

4. RESULTADOS

En este capítulo se entregan los resultados de la aplicación de la metodología propuesta sobre el cálculo de la evapotranspiración potencial.

4.1. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL DIARIA Y MENSUAL

En las siguientes tablas se presentan los resultados de evapotranspiración potencial por estación, en valores diarios y mensuales obtenidos luego de aplicar la metodología propuesta.

Tabla n°6: ET₀ diaria (mm/día) y mensual (mm/Mes). Meses de altas temperaturas.

Región	Provincia	Estación	ET ₀ diaria	ET ₀ mensual
Biobío	Arauco	Contulmo	5.14	154.2
	Arauco	Nahuelbuta	4.24	127.1
	Biobío	Alto Mallines	3.73	111.8
	Biobío	Quilaco	5.59	167.6
	Biobío	Rio Biobío en Llanquén	5.25	157.6
	Ñuble	Caracol	5.26	157.9
	Ñuble	Coihueco Embalse	5.97	179.0
	Ñuble	Diguillin	5.00	150.1
	Ñuble	La Punilla	4.85	145.6
Araucanía	Cautín	Cherquenco	5.05	151.4
	Cautín	Cunco	5.09	152.8
	Cautín	Lautaro	4.93	147.9
	Cautín	Ojos del Caburga	4.89	146.6
	Cautín	Pucón	4.52	135.6
	Cautín	Pueblo Nuevo (Temuco)	5.04	151.3
	Cautín	Puerto Saavedra	4.31	129.4
	Cautín	Puesco (aduana)	4.56	136.9
	Cautín	Temuco centro	4.33	129.8
	Cautín	Teodoro Schmitd	4.28	128.5
	Cautín	Tricauco	4.78	143.3
	Malleco	Angol	5.44	163.1
	Malleco	Collipulli	4.98	149.5
	Malleco	Ercilla	5.30	158.9
	Malleco	Laguna Malleco	4.91	147.3
	Malleco	Licura	5.33	159.9
	Malleco	Lonquimay	5.23	156.9
	Malleco	Malalcahuello	4.33	130.0
	Malleco	Manzanar	4.56	136.7
	Malleco	Traiguén	4.96	148.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla n°7: ET₀ diaria (mm/día) y mensual (mm/Mes). Meses de bajas temperaturas.

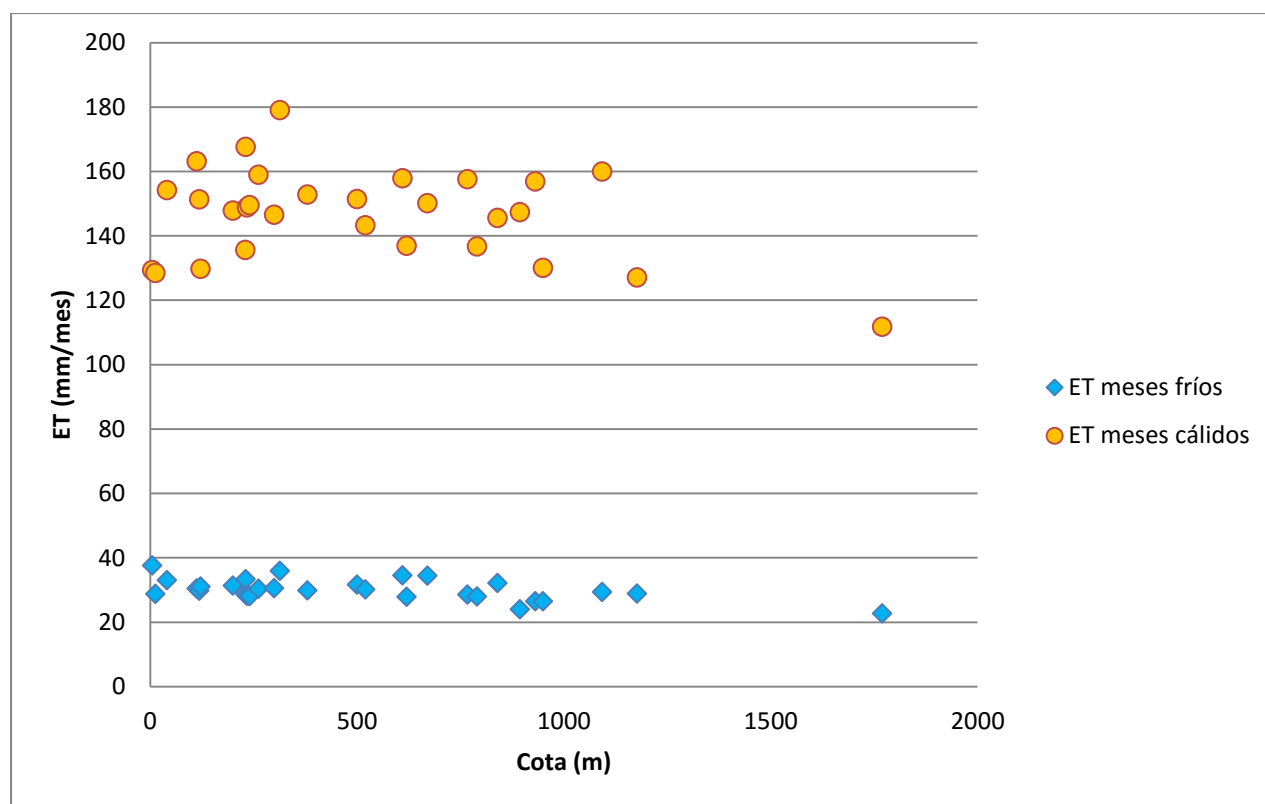
Región	Provincia	Estación	ET₀diaria	ET₀mensual
Biobío	Arauco	Contulmo	1.10	33.0
	Arauco	Nahuelbuta	0.96	28.9
	Biobío	Alto Mallines	0.76	22.7
	Biobío	Quilaco	1.11	33.3
	Biobío	Rio Biobío en Llanquén	0.95	28.6
	Ñuble	Caracol	1.15	34.6
	Ñuble	Coihueco Embalse	1.20	35.9
	Ñuble	Diguillin	1.15	34.5
	Ñuble	La Punilla	1.07	32.1
Araucanía	Cautín	Cherquenco	1.06	31.7
	Cautín	Cunco	1.00	29.9
	Cautín	Lautaro	1.05	31.4
	Cautín	Ojos del Caburga	1.02	30.5
	Cautín	Pucón	0.96	28.7
	Cautín	Pueblo Nuevo (Temuco)	0.99	29.8
	Cautín	Puerto Saavedra	1.25	37.6
	Cautín	Puesco (aduana)	0.93	27.9
	Cautín	Temuco centro	1.04	31.1
	Cautín	Teodoro Schmitd	0.96	28.8
	Cautín	Tricauco	1.01	30.2
	Malleco	Angol	1.02	30.5
	Malleco	Collipulli	0.94	28.1
	Malleco	Ercilla	1.01	30.4
	Malleco	Laguna Malleco	0.80	24.0
	Malleco	Licura	0.98	29.4
	Malleco	Lonquimay	0.88	26.4
	Malleco	Malalcahuello	0.88	26.5
	Malleco	Manzanar	0.93	28.0
	Malleco	Traiguén	0.94	28.1

Fuente: Elaboración propia

4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Y ALTURA:

Como se puede observar en la figura n°1, existe un relación inversamente proporcional entre la ET_0 y la altura, a medida que esta última va aumentando la ET_0 disminuye. Esta relación inversa es más fuerte en el caso de los meses fríos, donde presenta un coeficiente de correlación de -0.555, mientras que corresponde a un -0.321 para los meses cálidos. Los meses cálidos presenta una débil correlación al estar más cerca del 0 que del -1. La disminución de la evapotranspiración potencial tiene relación con el descenso de temperaturas a medida que aumenta la altura, lo que provoca una disminución de la temperatura media. Esto es debido al alejamiento de las estaciones que están en altura de la superficie terrestre, que actúa como foco calorífico desprendiéndose del calor recibido de la radiación solar y transmitiéndola a la capa de aire más cercana a ella (Alva, 1996).

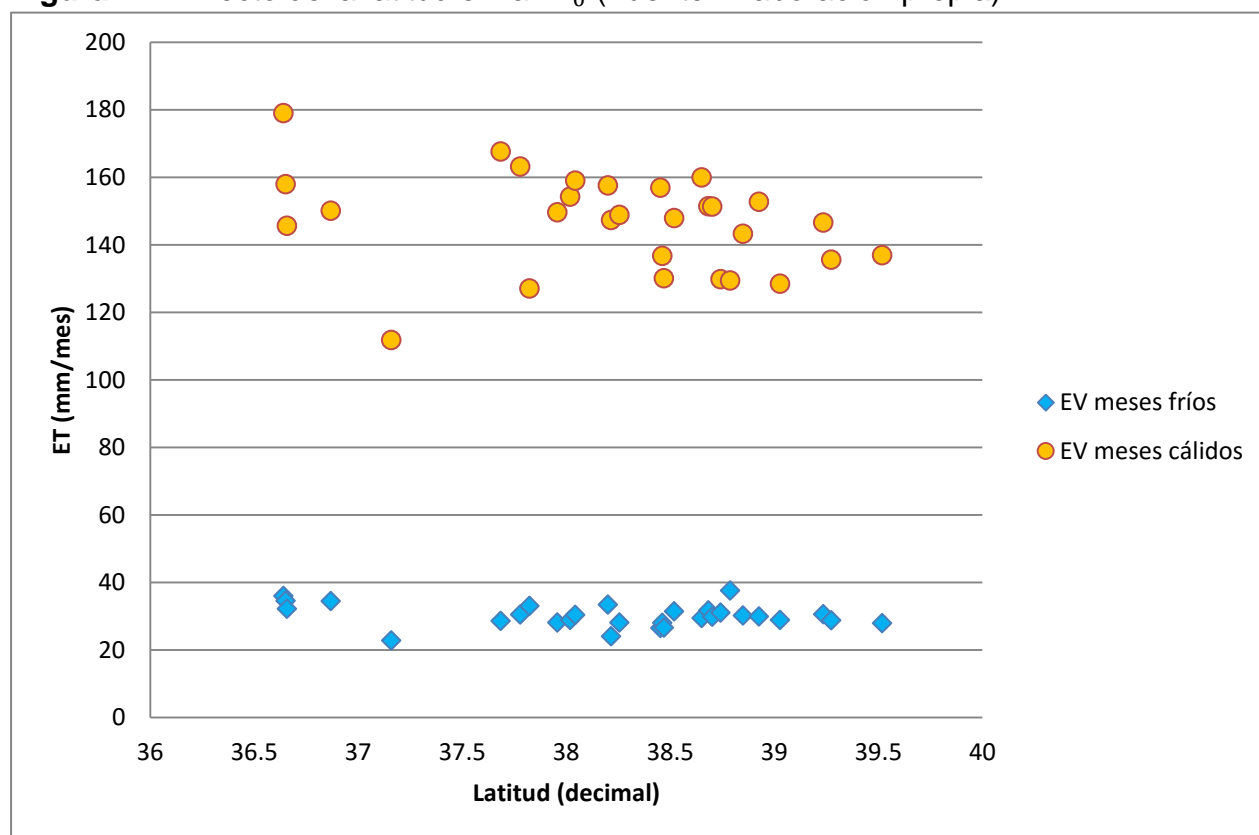
Figura n°1: Efecto de la altura en la ET_0 (Fuente: Elaboración propia).



4.4. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL Y LATITUD

De la figura n°2 se observa una relación inversamente proporcional, a medida que la latitud empieza a aumentar, es decir se empieza a acercarse más al polo sur, la evapotranspiración potencial disminuye. Esta relación sin embargo, resulta débil para ambas épocas, teniendo un coeficiente de correlación -0.308 y -0.261 para los meses cálidos y fríos respectivamente. Esto es debido a que la radiación solar extraterrestre es mayor cercana a la línea del ecuador, y a medida que se aleje de esa posición el área de estudio, los valores de radiación solar extraterrestre irán disminuyendo. Además es importante señalar que los valores de la radiación solar extraterrestre en Agosto son considerablemente mayores que en el resto de los meses fríos (ver tabla n°5), lo que genera variaciones importantes de evapotranspiración con respecto a los meses de Junio y Julio.

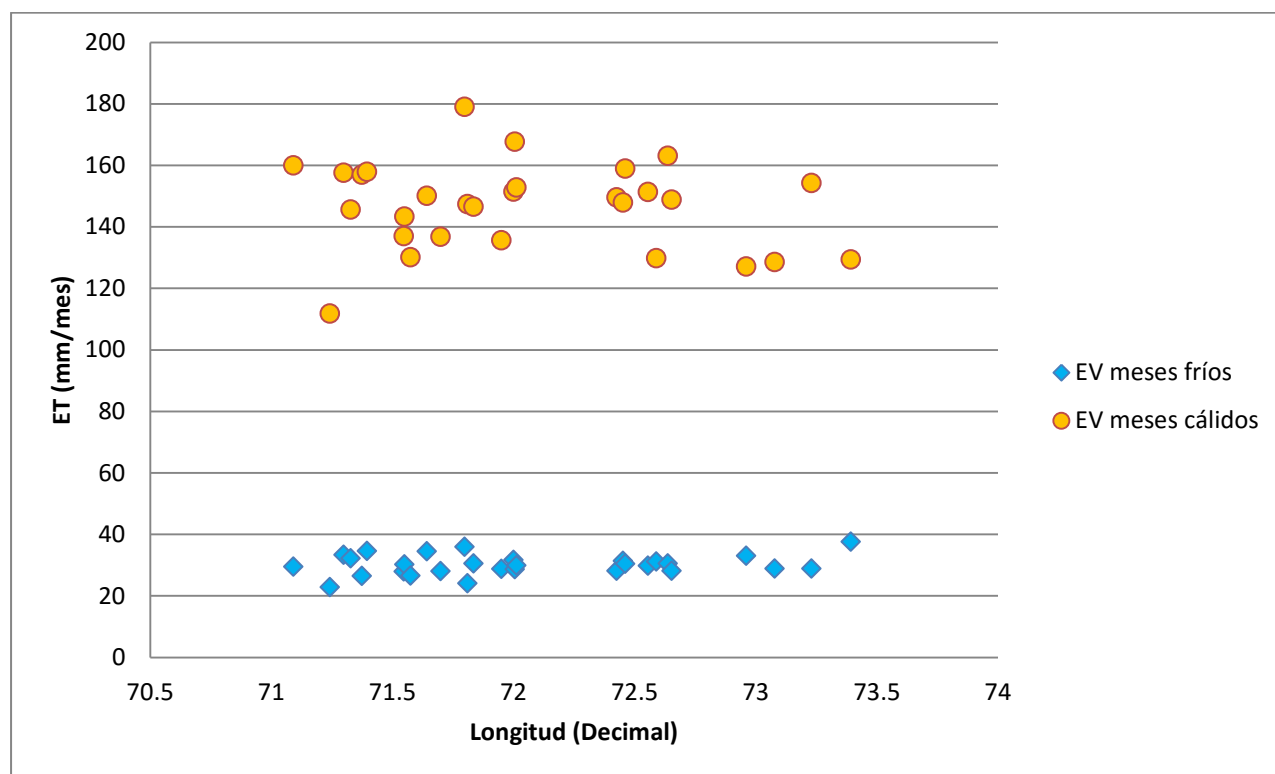
Figura n°2: Efecto de la latitud en la ET_0 (Fuente: Elaboración propia).



4.5. EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL Y LONGITUD

La figura n°3 muestra la relación entre la ET_0 y la longitud, la cual como se aprecia visualmente no es muy clara. Para los meses cálidos hay una relación inversamente proporcional con un coeficiente de correlación de -0.15, y para los meses fríos existe una relación directamente proporcional y un coeficiente de correlación de 0.22. El coeficiente nos señala una débil relación para ambos períodos, y además un contraste en cuanto al tipo de relación. Es por esto que no se puede identificar con certeza alguna relación entre ET_0 y longitud.

Figura n°3: Efecto de la longitud en la ET_0 (Fuente: Elaboración propia).



4.6. MAPAS DE ISOLINEAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EN LAS REGIONES DEL BIOBÍO Y DE LA ARAUCANÍA.

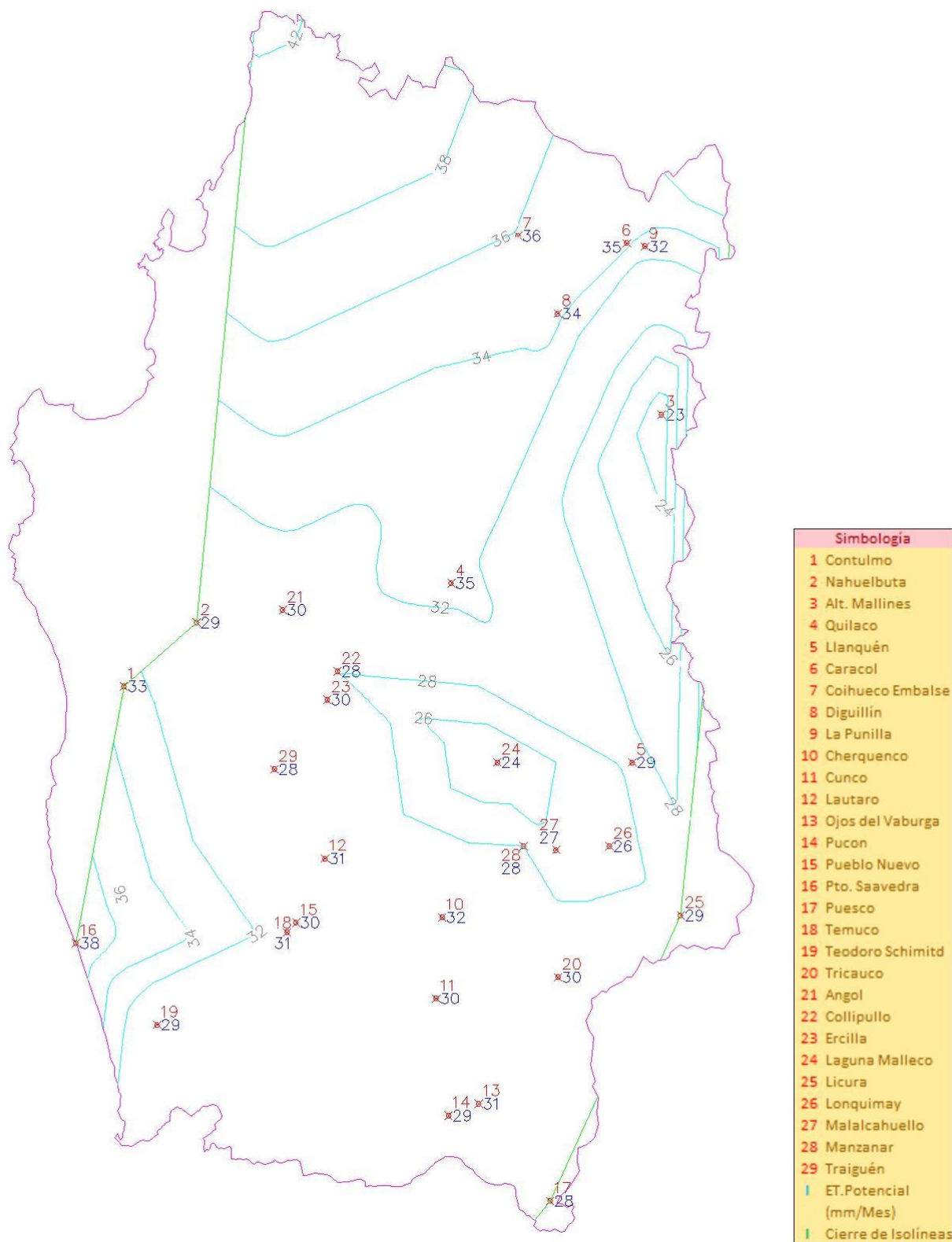
En las figuras n°4 y n°5 se presentan los resultados del uso de la metodología para generar isolíneas de evapotranspiración potencial usando los valores obtenidos de la ecuación de Hargreaves – Samani (1985). En dichos mapas se pueden apreciar tanto las isolíneas con sus respectivos valores, y las estaciones con su correspondiente valor de evapotranspiración potencial.

Los resultados en los meses cálidos son observables en la figura n°4. Debido al bajo coeficiente de correlación que presenta la evapotranspiración potencial con respecto a la altura, se favorece la aparición de muchas isolíneas. Es por esto que las isolíneas son representadas cada 7 mm/Mes de diferencia de evapotranspiración potencial, y así observar de una manera más general los cambios que ocurren en los distintos sectores. Como es posible observar se produce una disminución de los valores de evapotranspiración hacia el sector cordillerano que es el de mayor altitud.

La figura n°5 es la que muestra los resultados obtenidos en los meses más fríos considerados por este proyecto de título. En ella se puede apreciar una menor cantidad de isolíneas que en la figura n°4. Los cambios en la evapotranspiración son representados como isolíneas cada 2 mm/Mes de diferencia. En este caso los resultados sufren cambios menos abruptos y siguen una gradual disminución hacia la cordillera, lo que se relaciona con el coeficiente de correlación entre evapotranspiración potencial y altura el cual es más cercano al menos uno que al cero.

Tanto en la figura n°4 como en la figura n°5 se puede observar la disminución hacia el sur de los valores de evapotranspiración potencial lo que está directamente relacionado con los cambios en la latitud, y la radiación solar extraterrestre que disminuye a medida que se aleja de la línea ecuatorial.

Figura n°5: Isolíneas de ET_0 para los meses de bajas temperaturas en mm/Mes



4.7 FUNCIONES DE PROBABILIDAD

A continuación la tabla n°8 muestra la función de probabilidad que mejor se ajusta a la serie de datos de la estación meteorológica correspondiente. Aquellas estaciones a las que no se les asociaron una función de probabilidad, es debido a la cantidad deficiente de datos que proporciona la estación.

Tabla n°8: Funciones de probabilidad por estación y época a analizar.

Región	Provincia	Estación	Meses cálidos	Meses fríos
Biobío	Arauco	Contulmo	Normal	LogNormal
	Arauco	Nahuelbuta	Gumbel	Gumbel
	Biobío	Alto mallines	-	-
	Biobío	Quilaco	Normal	Normal
	Biobío	Rio Biobío en Llanquen	-	-
	Ñuble	Caracol	Normal	Normal
	Ñuble	Coihueco embalse	LogNormal	LogNormal
	Ñuble	Diguillin	Normal	Normal
	Ñuble	La Punilla	Normal	Normal
Araucanía	Cautín	Cherquenco	-	-
	Cautín	Cunco	-	-
	Cautín	Lautaro	Normal	LogNormal
	Cautín	Ojos del Caburga	-	-
	Cautín	Pucon	LogNormal	Normal
	Cautín	Pueblo Nuevo (Temuco)	-	-
	Cautín	Puerto Saavedra	Normal	Normal
	Cautín	Puesco (aduana)	Gumbel	Normal
	Cautín	Temuco centro	-	-
	Cautín	Teodoro Schmitd	Gumbel	Gumbel
	Cautín	Tricauco	Gumbel	LogNormal
	Malleco	Angol	Gumbel	Normal
	Malleco	Collipulli	LogNormal	Normal
	Malleco	Ercilla	LogNormal	Normal
	Malleco	Laguna Malleco	Normal	Gumbel
	Malleco	Licura	LogNormal	Normal
	Malleco	Lonquimay	Normal	Normal
	Malleco	Malalcahuello	Normal	LogNormal
	Malleco	Manzanar	Normal	LogNormal
	Malleco	Traiguén	LogNormal	Gumbel

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y mediante las comparaciones propuestas es que se ha llegado a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

5.1. CONCLUSIONES

- La evapotranspiración potencial se ve afectada por las condiciones de altura, principalmente en los meses fríos donde la correlación con la altura es más fuerte que en los meses cálidos. La disminución de la evapotranspiración potencial tiene relación con la baja en las temperaturas que es efecto del aumento de altura, lo que provoca una disminución de la temperatura media y por ende un cambio en la evapotranspiración potencial resultante.
- De la comparación de evapotranspiración potencial y latitud, se puede observar que existe un coeficiente de correlación débil y negativo, relativamente similar tanto en los meses cálidos como en los meses fríos. Se da una relación inversamente proporcional, disminuyendo la evapotranspiración potencial a medida que la latitud va aumentando, es decir a medida que se va alejando de la línea ecuatorial. Esto se debe a que la radiación solar extraterrestre va gradualmente disminuyendo hacia el sur, y en especial en los meses fríos, debido a la inclinación de la tierra. A pesar de que provoca variaciones, no son lo suficientemente apreciables principalmente porque en el área de estudio no hay grandes variaciones de latitud, y a pesar de que ejerce una influencia en el cálculo, esta es de menor grado que la Altura.
- De acuerdo a las comparaciones realizadas, no es posible señalar alguna relación lineal entre evapotranspiración potencial y variación de longitud, ya que en los meses cálidos los resultados difieren de los resultados de meses fríos, dando coeficientes de correlación opuestos en signo, y ambos muy débiles y cercanos al cero.
- Las isolíneas generadas ayudan de manera gráfica a observar las conclusiones de los puntos anteriores. Para los meses cálidos se generan constantes cambios en los valores de evapotranspiración potencial, pero que van a la baja a medida que se acercan a la zona cordillerana. A su vez en los meses fríos es posible observar también una disminución de la evapotranspiración potencial al acercarse a la zona cordillerana, pero este cambio se produce de manera más gradual y más constante que en los meses cálidos. Finalmente es apreciable la disminución de la evapotranspiración potencial hacia el sur, debido al cambio en las condiciones de radiación solar, que disminuye a medida que la zona de estudio se aleja de la línea ecuatorial.

5.2. RECOMENDACIONES Y COMENTARIOS

Los valores de evapotranspiración potencial calculados están dados en base a milímetros por mes, para cualquier mes que se tome considerando si corresponde a una época de temperaturas cálidas (Diciembre, Enero y Febrero), o para una época de temperaturas frías (Junio, Julio y Agosto), dando de esta manera el valor más probable de evapotranspiración potencial por estación mensual. Es por esto último que no es posible realizar una comparación con el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987), ya que primeramente trabaja con evapotranspiración real, y segundo porque trabaja de forma anual dichos valores.

Es importante señalar además la ausencia de estaciones meteorológicas con datos de temperatura cercanos a la costa, siendo solamente una estación (Puerto Saavedra) la que poseía datos relevantes para este proyecto. También hay un déficit de datos en provincias importantes como la de Concepción y en zonas de transición costa – interior, lo que habría ayudado a observar de manera más precisa los cambios por efecto de altura y el efecto que tiene sobre la evapotranspiración la cercanía al mar. Todo este déficit de información significó no poder abarcar todo el área de estudio con isolíneas e incluso tener que extrapolar un punto para cubrir el área cercana a la costa en la región del Biobío. Todos estos datos además habrían ayudado a suavizar aún más las curvas de isolíneas de evapotranspiración potencial. Sería recomendable en un futuro poder contar con esos datos para llevar a cabo una labor más detallada en cuanto a los mapas de isolíneas.

Finalmente se recomienda, para futuras investigaciones no utilizar el mes de agosto dentro de los meses fríos, ya que la radiación extraterrestre de ese mes es alta y por lo tanto los valores de evapotranspiración potencial resultantes no son homogéneos con respecto a los meses de Junio y Julio, observándose importantes diferencias entre ellos.

6. BIBLIOGRAFÍA:

- **Allen, R.G.; L. S. Pereira y D. Raes** (1998). "Crop evapotranspiration" – "Guidelines for computing crop water requirements". ". Estudio de Riego y Drenaje No. 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
- **Alva Valdivia, L.** (1996). "Propiedades geofísicas de la tierra". Plaza y Valdés. México
- **Chow, Ven Te.** (1994). "Hidrología Aplicada". Bogotá, Mc Graw Hill. Primera edición.
- **Doorenbos, J. y Pruitt, W.O.** (1975). "Guidelines for predicting crop water requirements". Estudio de Riego y Drenaje No. 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- **DGA.** (1988). "Balance Hídrico de Chile". Dirección General de Aguas. Chile
- **FAO.** (2006). "Evapotranspiración del Cultivo". Guía para la determinación de los requerimientos de agua para los cultivos. No. 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- **Hargreaves, G.H., Samani, Z.A.** (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99
- **Jensen, M.E., Burman, R.D., y Allen, R.G.** (1990). "Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements". ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70., Am. Soc. Civil Engrs. New York, Estados Unidos de América.
- **ODEPA. (2015).** "Ficha Nacional Actualización 2015". Disponible en la Web: www.ODEPA.cl. Consulta: Diciembre, 2015.
- **ONU. (1992).** "Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente". Irlanda
- **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.** (2003). "GEO América Latina y el Caribe: Perspectivas del Medio Ambiente". Costa Rica
- **Samani, Z.** (2000). "Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 265-267

ANEXOS

ANEXO TABLAS:

A. TABLAS DE APOYO

Se muestran las tablas utilizadas en el proyecto de título para realizar los cálculos pertinentes.

A1. Radiación Solar Extraterrestre

Fuente: Allen et al. (1998)

Northern Hemisphere												Southern Hemisphere												
Lat. deg.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	28.0	14.9	4.9	0.1	0.0	7.0	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3	45.3
0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	28.6	16.1	6.0	0.7	0.0	6.8	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7
0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1	6.6	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1
1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6	6.4	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9
2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3	6.2	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3	43.9
3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2	6.0	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7	43.9
4.3	9.5	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1	5.8	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0
5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2	5.6	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1
6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2	5.4	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3
7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4	5.2	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4
8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.9	10.2	7.5	5.0	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5
10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7	4.8	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5
11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9	4.6	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6
12.5	18.0	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1	4.4	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6
13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4	4.2	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6
15.0	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30.0	22.5	16.3	13.6	4.0	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6
16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37.0	30.7	23.6	17.5	14.8	3.8	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5
17.5	22.6	29.0	35.7	40.0	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1	3.6	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4
18.7	23.7	29.9	36.1	40.0	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3	3.4	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3
19.9	24.8	30.7	36.5	40.0	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5	3.2	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1
21.1	25.8	31.4	36.8	40.0	41.2	40.6	38.0	33.4	27.6	22.2	19.8	3.0	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9
22.3	26.8	32.2	37.1	40.0	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.3	21.0	2.8	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.6
23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2	2.6	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3
24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3	2.4	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	43.0
25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40.0	39.6	38.4	35.4	31.0	26.6	24.5	2.2	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.6
26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6	2.0	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2	42.1
27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8	1.8	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9	41.7
28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9	1.6	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6	41.2
29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9	1.4	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.6	38.7	40.2	40.6
30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0	1.2	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0
31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0	1.0	39.5	39.3	37.8	34.6	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3	39.4
32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0	0.8	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8	38.7
33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9	0.6	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2	38.0
34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9	0.4	37.6	38.3	38.0	36.0	33.4	31.8	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6	37.2
35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8	0.2	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0	36.4
36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6	0.0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6

B. TABLAS DE RESULTADOS

A continuación se muestran las tablas de resultados de distintas comparaciones que permitieron llegar a las figuras y mapas mostrados en el presente proyecto de título.

B1. Altura – Evapotranspiración Potencial. Meses cálidos

Estación, con su altura de cota, y su correspondiente evapotranspiración potencial para los meses cálidos

Estación	Altura(m)	ET₀ (mm/mes)
Alto Mallines	1770	111.79
Nahuelbuta	1177	127.07
Teodoro Schmitd	13	128.47
Puerto Saavedra	5	129.36
Temuco Centro	122	129.78
Malalcahuello	950	130.03
Pucón	230	135.59
Manzanar	790	136.71
Puesco (Aduana)	620	136.92
Tricauco	520	143.26
La Punilla	840	145.57
Ojos del Caburga	300	146.56
Laguna Malleco	894	147.30
Lautaro	200	147.86
Traiguén	234	148.81
Collipulli	240	149.54
Diguillín	670	150.10
Pueblo Nuevo (Temuco)	119	151.30
Cherquenco	500	151.40
Cunco	380	152.76
Contulmo	41	154.19
Lonquimay	931	156.88
Rio Biobío en Llanquén	767	157.57
Caracol	610	157.88
Ercilla	262	158.95
Licura	1093	159.91
Angol	113	163.09
Quilaco	231	167.60
Coihueco Embalse	314	179.00

Fuente: Elaboración propia

B2. Altura – Evapotranspiración Potencial. Meses fríos.

Estación, con su altura de cota, y correspondiente evapotranspiración potencial para los meses fríos.

Estación	Altura (m)	ET₀ (mm/día)
Alto Mallines	1770	22.74
Rio Biobío en Llanquén	767	28.58
Quilaco	231	33.35
Laguna Malleco	894	24.02
Lonquimay	931	26.45
Malalcahuello	950	26.52
Puesco (Aduana)	620	27.88
Manzanar	790	28.00
Collipulli	240	28.09
Traiguén	234	28.12
Pucón	230	28.75
Teodoro Schmitd	13	28.82
Nahuelbuta	1177	28.87
Licura	1093	29.41
Pueblo Nuevo (Temuco)	119	29.77
Cunco	380	29.86
Tricauco	520	30.15
Ercilla	262	30.35
Angol	113	30.49
Ojos del Caburga	300	30.54
Temuco Centro	122	31.07
Lautaro	200	31.36
Cherquenco	500	31.69
La Punilla	840	32.14
Contulmo	41	33.00
Diguillín	670	34.46
Coihueco Embalse	314	35.91
Caracol	610	34.56
Puerto Saavedra	5	37.58

Fuente: Elaboración propia

B3. Latitud – Evapotranspiración Potencial. Meses cálidos.

Estación con su latitud y correspondiente evapotranspiración potencial para los meses cálidos.

Estación	Latitud sexagesimal	Latitud decimal	ET ₀ mes (mm/mes)
Alto Mallines	37° 09' 32"	37.1588889	111.79
Nahuelbuta	37° 49' 24"	37.8233333	127.07
Teodoro Schmitd	39° 01' 40"	39.0277778	128.47
Puerto Saavedra	38° 47' 19"	38.7886111	129.36
Temuco Centro	38° 44' 33"	38.7425	129.78
Malalcahuello	38° 28' 13"	38.4702778	130.03
Pucón	39° 16' 31"	39.2752778	135.59
Manzanar	38° 27' 47"	38.4630556	136.71
Puesco (Aduana)	39° 31' 09"	39.5191667	136.92
Tricauco	38° 51' 02"	38.8505556	143.26
La Punilla	36° 39' 30"	36.6583333	145.57
Ojos del Caburga	39° 14' 12"	39.2366667	146.56
Laguna Malleco	38° 12' 56"	38.2155556	147.30
Lautaro	38° 31' 07"	38.5186111	147.86
Traiguén	38° 15' 22"	38.2561111	148.81
Collipulli	37° 57' 30"	37.9583333	149.54
Diguillín	36° 52' 07"	36.8686111	150.10
Pueblo Nuevo (Temuco)	38° 42' 46"	38.7127778	151.30
Cherquenco	38° 41' 02"	38.6838889	151.40
Cunco	38° 55' 37"	38.9269444	152.76
Contulmo	38° 01' 07"	38.0186111	154.19
Lonquimay	38° 27' 13"	38.4536111	156.88
Rio Biobío en Llanquén	38° 12' 03"	38.2008333	157.57
Caracol	36° 39' 04"	36.6511111	157.88
Ercilla	38° 02' 39"	38.0441667	158.95
Licura	38° 39' 06"	38.6516667	159.91
Angol	37° 46' 46"	37.7794444	163.09
Quilaco	37° 41' 06"	37.685	167.60
Coihueco Embalse	36° 38' 27"	36.6408333	179.00

Fuente: Elaboración propia

B4. Latitud – Evapotranspiración Potencial. Meses fríos.

Estación con su latitud y correspondiente evapotranspiración potencial para los meses fríos.

Estación	Latitud sexagesimal	Latitud decimal	ET₀mes (mm/mes)
Alto Mallines	37° 09' 32"	37.1588889	22.74
Laguna Malleco	38° 12' 56"	38.2155556	24.02
Lonquimay	38° 27' 13"	38.4536111	26.45
Malalcahuello	38° 28' 13"	38.4702778	26.52
Puesco (Aduana)	39° 31' 09"	39.5191667	27.88
Manzanar	38° 27' 47"	38.4630556	28.00
Collipulli	37° 57' 30"	37.9583333	28.09
Traiguén	38° 15' 22"	38.2561111	28.12
Quilaco	37° 41' 06"	37.685	28.58
Pucón	39° 16' 31"	39.2752778	28.75
Teodoro Schmitd	39° 01' 40"	39.0277778	28.82
Contulmo	38° 01' 07"	38.0186111	28.87
Licura	38° 39' 06"	38.6516667	29.41
Pueblo Nuevo (Temuco)	38° 42' 46"	38.7016667	29.77
Cunco	38° 55' 37"	38.9269444	29.86
Tricauco	38° 51' 02"	38.8505556	30.15
Ércilla	38° 02' 39"	38.0441667	30.35
Angol	37° 46' 46"	37.7794444	30.49
Ojos del Caburga	39° 14' 12"	39.2366667	30.54
Temuco Centro	38° 44' 33"	38.7425	31.07
Lautaro	38° 31' 07"	38.5186111	31.36
Cherquenco	38° 41' 02"	38.6838889	31.69
La Punilla	36° 39' 30"	36.6583333	32.14
Nahuelbuta	37° 49' 24"	37.8233333	33.00
Rio Biobío en Llanquén	38° 12' 03"	38.2008333	33.35
Diguillín	36° 52' 07"	36.8686111	34.46
Caracol	36° 39' 04"	36.6511111	34.56
Coihueco Embalse	36° 38' 27"	36.6408333	35.91
Puerto Saavedra	38° 47' 19"	38.7886111	37.58

Fuente: Elaboración propia

B5. Longitud – Evapotranspiración. Meses cálidos.

Estación con su longitud y correspondiente evapotranspiración potencial para los meses cálidos.

Estación	Longitud sexagesimal	Longitud decimal	ET₀mes (mm/mes)
Alto Mallines	71° 14' 33"	71.2425	111.79
Nahuelbuta	72° 57' 38"	72.9605556	127.07
Teodoro Schmitd	73° 04' 41"	73.0780556	128.47
Puerto Saavedra	73° 23' 37"	73.3936111	129.36
Temuco Centro	72° 35' 24"	72.59	129.78
Malalcahuello	71° 34' 31"	71.5752778	130.03
Pucón	71° 57' 01"	71.9502778	135.59
Manzanar	71° 41' 57"	71.6991667	136.71
Puesco (Aduana)	71° 32' 52"	71.5477778	136.92
Tricauco	71° 33' 00"	71.55	143.26
La Punilla	71° 19' 40"	71.3277778	145.57
Ojos delCaburga	71° 50' 08"	71.8355556	146.56
Laguna Malleco	71° 48' 38"	71.8105556	147.30
Lautaro	72° 27' 08"	72.4522222	147.86
Traiguén	72° 39' 13"	72.6536111	148.81
Collipulli	72° 25' 32"	72.4255556	149.54
Diguillín	71° 38' 33"	71.6425	150.10
Pueblo Nuevo (Temuco)	72° 33' 21"	72.5558333	151.30
Cherquenco	72° 00' 00"	72	151.40
Cunco	72° 00' 45"	72.0125	152.76
Contulmo	73° 13' 48"	73.23	154.19
Lonquimay	71° 22' 27"	71.3741667	156.88
Rio Biobío en Llanquen	71° 17' 56"	71.2988889	157.57
Caracol	71° 23' 42"	71.395	157.88
Ercilla	72° 27' 40"	72.4611111	158.95
Licura	71° 05' 31"	71.0919444	159.91
Angol	72° 38' 14"	72.6372222	163.09
Quilaco	72° 00' 21"	72.0058333	167.60
Coihueco Embalse	71° 47' 56"	71.7988889	179.00

Fuente: Elaboración propia

B6. Longitud – Evapotranspiración. Meses fríos.

Estación con su longitud y correspondiente evapotranspiración potencial para los meses fríos.

Estación	Longitud sexagesimal	Longitud decimal	ET₀mes (mm/mes)
Contulmo	73° 13' 48"	73.23	28.87
Nahuelbuta	72° 57' 38"	72.9605556	33.00
Alto Mallines	71° 14' 33"	71.2425	22.74
Quilaco	72° 00' 21"	72.0058333	28.58
Rio Biobío en Llanquén	71° 17' 56"	71.2988889	33.35
Caracol	71° 23' 42"	71.395	34.56
Coihueco Embalse	71° 47' 56"	71.7988889	35.91
Diguillín	71° 38' 33"	71.6425	34.46
La Punilla	71° 19' 40"	71.3277778	32.14
Cherquenco	72° 00' 00"	72	31.69
Cunco	72° 00' 45"	72.0125	29.86
Lautaro	72° 27' 08"	72.4522222	31.36
Ojos del Caburga	71° 50' 08"	71.8355556	30.54
Pucón	71° 57' 01"	71.9502778	28.75
Pueblo Nuevo (Temuco)	72° 33' 21"	72.5558333	29.77
Puerto Saavedra	73° 23' 37"	73.3936111	37.58
Puesco (Aduana)	71° 32' 52"	71.5477778	27.88
Temuco Centro	72° 35' 24"	72.59	31.07
Teodoro Schmitd	73° 04' 41"	73.0780556	28.82
Tricauco	71° 33' 00"	71.55	30.15
Angol	72° 38' 14"	72.6372222	30.49
Collipulli	72° 25' 32"	72.4255556	28.09
Ércilla	72° 27' 40"	72.4611111	30.35
Laguna Malleco	71° 48' 38"	71.8105556	24.02
Licura	71° 05' 31"	71.0919444	29.41
Lonquimay	71° 22' 27"	71.3741667	26.45
Malalcahuello	71° 34' 31"	71.5752778	26.52
Manzanar	71° 41' 57"	71.6991667	28.00
Traiguén	72° 39' 13"	72.6536111	28.12

Fuente: Elaboración propia

ANEXO ECUACIONES

Se entregan las ecuaciones utilizadas en secciones de la metodología que no poseen relación directa con los objetivos de presente proyecto.

C. ECUACIONES DE FUNCIONES DE PROBABILIDAD ANALIZADAS

A continuación se detallan las funciones de probabilidad utilizadas en el análisis de datos

C1. Distribución normal

La distribución Normal es una distribución simétrica en forma de campana (campana de Gauss).

Su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), -\infty \leq x \leq \infty$$

De donde:

$\mu = \bar{x}$ = Promedio

$\sigma = S_x$ = Desviación Estándar

C2. Distribución LogNormal

Su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right), x > 0$$

De donde:

$y = \ln(x)$ = Logaritmo natural de los datos

$\mu_y = \bar{y}$ = Promedio.

$\sigma_y = S_y$ = Desviación Estándar.

C3. Distribución tipo Gumbel

La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} * \left(-\frac{x - \mu}{\alpha}\right) * \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\alpha}\right)\right)$$

De donde:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} * S}{\pi}$$

$$\mu = \bar{x} - 0.5772 * \alpha$$

La función acumulada (FDA) se obtiene por integración de la FDP, quedando como se muestra a continuación:

$$FDP(x \leq X) = \exp\left[-\exp\left(\frac{x - \mu}{\alpha}\right)\right]; -\infty \leq x \leq \infty$$