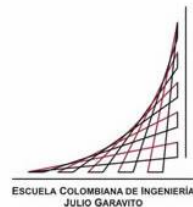


Maestría en Ingeniería Civil

Regionalización del cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) a escala mensual y anual para el departamento de Cundinamarca, a partir de los datos de evaporación del tanque clase A relacionados con los valores de ET_o obtenidos por el método de la FAO Penman-Monteith

Ivan Dario Castillo Molano

Bogotá, D.C., 30 de enero de 2024



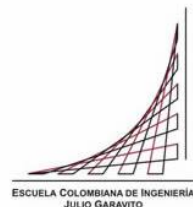
Regionalización del cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) a escala mensual y anual para el departamento de Cundinamarca, a partir de los datos de evaporación del tanque clase A relacionados con los valores de ET_o obtenidos por el método de la FAO Penman-Monteith

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente

Germán Eduardo Acero Riveros

Director

Bogotá, D.C., 30 de enero de 2024



La tesis de maestría titulada “Regionalización del cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) a escala mensual y anual para el departamento de Cundinamarca, a partir de los datos de evaporación del tanque clase A relacionados con los valores de ET_o obtenidos por el método de la FAO Penman-Monteith”, presentada por Ivan Dario Castillo Molano, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

Germán Eduardo Acero Riveros

Director de la tesis

Germán Santos Granados

Jurado

Gustavo Herrán Sandoval

Jurado

Bogotá, D.C., 30 de enero de 2024

Dedicatoria

A mi esposa Mónica y a nuestro hijo Leonardo que viene en camino, ya que ellos son mi motor para seguir adelante y la alegría que llena todos los días de mi existencia.

A mi madre María Antonia que siempre me ha acompañado y apoyado, por ser la mejor que cualquier hijo pudiese tener.

A mi padre Jorge que, con sus valores, enseñanzas y esfuerzos, me demostró el verdadero cariño y a luchar contra las adversidades.

Y a mi familia, porque unidos vamos creciendo.

Agradecimientos

A Dios y a la vida por darme la oportunidad de estudiar y avanzar nuevos peldaños a nivel personal y profesional.

Al profesor Germán Acero por sus invaluable consejos para el desarrollo de este trabajo.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por ofrecerme la posibilidad de realizar esta maestría.

Al IDEAM y la CAR por facilitarme la información climatológica.

Y a mi amigo Diego Sánchez, porque gracias a él aprendí muchas cosas que me han hecho crecer como profesional.

Resumen

La evapotranspiración es de suma importancia a la hora de establecer volúmenes de escorrentía de una cuenca y en la estimación de las necesidades de agua de un cultivo. El concepto de evapotranspiración fue introducido por primera vez por Thornthwaite (Thornthwaite, 1948). Aunque se puede medir directamente con lisímetros, se han desarrollado y publicado una gran variedad de métodos para el cálculo de la evapotranspiración, desde los más sencillos como el de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) hasta otros más complejos como el de Penman-Monteith (Monteith, 1965), Blaney-Criddle (versión FAO de Doorenbos y Pruitt, 1977) y Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972).

El IDEAM realizó un estudio donde concluyó que el método de la FAO Penman-Monteith es el más apropiado para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) en Colombia (IDEAM, 2018). Implementarlo requiere de varios parámetros climáticos: temperatura, humedad relativa, brillo o radiación solar y velocidad del viento.

A pesar de que la adquisición de datos climatológicos se ha facilitado gracias a los avances tecnológicos, aún prevalecen problemas para recopilar la información como pocas estaciones con registros, localización y densidad de las estaciones y cantidad de datos ausentes, principalmente de: humedad, velocidad del viento, brillo y radiación solar. Esto imposibilita emplear la metodología de la FAO Penman-Monteith en muchas zonas de Colombia y para este caso, en Cundinamarca.

Como una solución, en este trabajo se encontró una relación directa entre la evaporación de tanque clase A (Ev) y la ET_o a escala mensual y anual, para el área de Cundinamarca, con el fin de calcular la ET_o solo con datos de Ev.

Para llegar a esta relación, se recopiló la información climatológica disponible en el IDEAM y la CAR con un periodo de análisis de los datos entre 1991 y 2013, calculando la ET_o para las estaciones que tuvieran registros de todas variables requeridas.

En primera instancia, se comprobó que la temperatura y la altitud se relacionan con una regresión lineal decreciente, que con matemática ráster y un modelo digital de terreno (MDT) de Cundinamarca, arrojó como resultado un mapa de temperaturas para el departamento. Por último, se contrastó la temperatura y la Ev obteniéndose relaciones

polinómicas y exponenciales y posteriormente los mapas de Ev. Con estos mapas de Ev multiplicados por los coeficientes de relación, se generaron los mapas de ETo para Cundinamarca.

Índice General

1	Introducción	23
2	Planteamiento del problema	26
3	Objetivos.....	28
3.1	Objetivo general	28
3.2	Objetivos específicos.....	28
4	Marco teórico.....	30
4.1	Descripción del área de estudio	30
4.2	Evaporación	32
4.2.1	Factores que influyen en la evaporación	32
4.2.2	Medición de la evaporación	33
4.2.3	Métodos teóricos para el cálculo de la evaporación.....	38
4.2.4	Cálculo de la evaporación	39
4.3	Transpiración.....	40
4.3.1	Factores que influyen en la transpiración.....	41
4.3.2	Medición de la transpiración	41
4.4	Evapotranspiración.....	42
4.4.1	Factores que influyen en la evapotranspiración	43
4.4.2	Medición de la evapotranspiración.....	44
4.4.3	Cálculo de la evapotranspiración.....	47
5	Metodología.....	51
5.1	Recopilación de la información climatológica	53
5.1.1	Evaporación	55
5.1.2	Temperatura.....	63
5.1.3	Evapotranspiración de referencia ETo.....	66
5.2	Cálculo de la ETo por el método de la FAO Penman-Monteith.....	71

5.2.1	Presión atmosférica (P)	75
5.2.2	Calor latente de vaporización (λ)	75
5.2.3	Constante Psicrométrica (γ).....	75
5.2.4	Temperatura del aire	75
5.2.5	Humedad del aire	76
5.2.6	Radiación	78
5.2.7	Velocidad del viento	84
5.2.8	Cálculo de datos climáticos faltantes	84
5.3	Estadística de los datos.....	87
5.3.1	Homogeneidad de las series de datos.....	87
5.3.2	Valores atípicos o extremos.....	89
5.3.3	Modelos de regresión	91
5.4	Construcción de los mapas	94
5.4.1	Matemática ráster.....	96
5.4.2	Interpolación IDW.....	97
6	Resultados.....	99
6.1	Temporalidad de los registros y selección de las estaciones de referencia	99
6.2	Parámetros climáticos para el cálculo de la ETo	101
6.2.1	Temperatura máxima.....	103
6.2.2	Temperatura mínima	106
6.2.3	Humedad relativa máxima	108
6.2.4	Humedad relativa media.....	109
6.2.5	Humedad relativa mínima.....	111
6.2.6	Velocidad del viento	113
6.2.7	Brillo solar.....	115
6.3	Evapotranspiración de referencia ETo.....	117

6.4	Evaporación del tanque clase A	121
6.5	Correlación entre la ETo y la evaporación	123
6.6	Mapas de temperatura, evaporación y ETo para Cundinamarca	129
6.6.1	Modelo digital de terreno MDT.....	130
6.6.2	Temperatura media	131
6.6.3	Evaporación	137
6.6.4	Coeficientes de relación	142
6.6.5	Evapotranspiración de referencia ETo.....	147
7	Conclusiones y recomendaciones	149
7.1	Conclusiones.....	149
7.2	Recomendaciones.....	152
8	Bibliografía.....	154
9	Anexos	158
9.1	Anexo 1. Información de las series climatológicas.....	158
9.2	Anexo 2. Shapes de las estaciones.....	181
9.3	Anexo 3. Imágenes	182
9.4	Anexo 4. Memorias del análisis estadístico de la información climatológica ...	183
9.4.1	Parámetros climáticos para el cálculo de la ETo.....	183
9.4.2	Evapotranspiración de referencia ETo.....	215
9.5	Anexo 5. Memorias del cálculo de la ETo.....	227
9.6	Anexo 6. Relación entre evaporación y ETo.....	228
9.7	Anexo 7. Modelos de regresión para ajuste de regionalización	229
9.8	Anexo 8. Mapas de regionalización para el departamento de Cundinamarca.	234
9.8.1	Mapas de temperatura.....	235
9.8.2	Mapas de evaporación	247
9.8.3	Mapas de coeficientes	259

9.8.4	Mapas de ETo	271
-------	--------------------	-----

Índice de tablas

Tabla 5-1	Evaporación total mensual registrada en la estación La Mesa.....	56
Tabla 5-2	Evaporación total diaria registrada en la estación La Mesa en el año 1999..	57
Tabla 5-3	Estaciones registradoras de evaporación en Cundinamarca	58
Tabla 5-4	Porcentaje de datos de evaporación faltantes para cada estación en el periodo de tiempo seleccionado	61
Tabla 5-5	Estaciones que registran evaporación seleccionadas para el estudio.....	62
Tabla 5-6	Estaciones que registran temperatura máxima seleccionadas para el departamento de Cundinamarca.....	64
Tabla 5-7	Estaciones que registran temperatura mínima seleccionadas para el departamento de Cundinamarca.....	65
Tabla 5-8	Parámetros climáticos que registran las estaciones con datos de evaporación en el departamento de Cundinamarca	67
Tabla 5-9	Estaciones empleadas para el cálculo de la ETo.....	68
Tabla 6-1	Resumen de las estaciones seleccionadas que registran evaporación.....	99
Tabla 6-2	Estaciones disponibles para el cálculo de la ETo en el departamento de Cundinamarca	102
Tabla 6-3	Valores estadísticos de la temperatura máxima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	104
Tabla 6-4	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para temperatura máxima en el cálculo de ETo	104
Tabla 6-5	Valores estadísticos de la temperatura mínima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	106
Tabla 6-6	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para temperatura mínima en el cálculo de ETo.....	107
Tabla 6-7	Valores estadísticos de la humedad relativa máxima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	108
Tabla 6-8	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para humedad relativa máxima en el cálculo de ETo.....	108
Tabla 6-9	Valores estadísticos de la humedad relativa media de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	110

Tabla 6-10	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para humedad relativa media en el cálculo de ETo	110
Tabla 6-11	Valores estadísticos de la humedad relativa mínima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	112
Tabla 6-12	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para humedad relativa mínima en el cálculo de ETo	112
Tabla 6-13	Valores estadísticos de la velocidad del viento de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	114
Tabla 6-14	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para velocidad del viento en el cálculo de ETo	114
Tabla 6-15	Valores estadísticos de brillo solar de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	116
Tabla 6-16	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para brillo solar en el cálculo de ETo	116
Tabla 6-17	Valores estadísticos de la ETo a nivel diario.....	118
Tabla 6-18	Valores estadísticos de la ETo totales mensuales	118
Tabla 6-19	Valores medios de la ETo totales anuales	119
Tabla 6-20	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para la ETo	119
Tabla 6-21	Valores estadísticos de la evaporación.....	121
Tabla 6-22	Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para las series de evaporación en el departamento de Cundinamarca.....	122
Tabla 6-23	Valores mínimos de evaporación y ETo.....	125
Tabla 6-24	Valores mínimos de evaporación y ETo con tratamiento de datos.....	125
Tabla 6-25	Coeficiente de relación ETo/Ev anual multianual	128
Tabla 6-26	Coeficientes de relación mensual multianual entre evaporación y ETo...	129
Tabla 6-27	Temperatura media mensual y anual multianual registrada en las estaciones en el departamento de Cundinamarca.....	132
Tabla 6-28	Parámetros del modelo de regresión lineal simple para las series de temperatura media vs altitud en el departamento de Cundinamarca.....	133
Tabla 6-29	Evaporación media total mensual y media total anual multianual registrada en las estaciones en el departamento de Cundinamarca.....	137

Tabla 6-30 Ecuaciones de los modelos de regresión de ajuste para las series de evaporación media total mensual y media total anual vs temperatura media en el departamento de Cundinamarca.....	139
---	-----

Índice de figuras

Figura 2-1	Árbol del problema para el cálculo de la ETo en Cundinamarca	27
Figura 3-1	Árbol de objetivos para el cálculo de la ETo en Cundinamarca.....	29
Figura 4-1	División política del departamento de Cundinamarca	31
Figura 4-2	Esquema del tanque evaporímetro clase A.....	35
Figura 4-3	Factores que afectan la evapotranspiración.....	44
Figura 4-4	Esquema de un lisímetro	46
Figura 5-1	Diagrama metodológico de la regionalización de la ETo para el departamento de Cundinamarca	52
Figura 5-2	Distribución de las estaciones hidro-climatológicas en Cundinamarca.....	54
Figura 5-3	Distribución de las estaciones de evaporación en Cundinamarca.....	55
Figura 5-4	Localización de las estaciones de evaporación seleccionadas	63
Figura 5-5	Localización de las estaciones de temperatura seleccionadas	66
Figura 5-6	Estaciones en Cundinamarca con registros de los parámetros requeridos para calcular la ETo.....	69
Figura 5-7	Evapotranspiración del cultivo de referencia bajo condiciones estándar ...	72
Figura 5-8	Características del cultivo hipotético de referencia	73
Figura 5-9	Componentes de la radiación	79
Figura 5-10	MDT del departamento de Cundinamarca sin procesar	95
Figura 5-11	Calculadora ráster en el ambiente de QGIS.....	96
Figura 5-12	Interpolación IDW	98
Figura 6-1	Distribución de las estaciones registradoras de evaporación seleccionadas para el departamento de Cundinamarca	101
Figura 6-2	Estaciones en Cundinamarca con registros de los parámetros requeridos para calcular la ETo.....	103
Figura 6-3	Distribución de las estaciones seleccionadas en el departamento de Cundinamarca para la construcción de los mapas.....	130
Figura 6-4	MDT del departamento de Cundinamarca procesado.....	131
Figura 6-5	Mapas de temperatura media mensual multianual para el departamento de Cundinamarca	135
Figura 6-6	Mapa de temperatura media anual multianual para el departamento de Cundinamarca	136

Figura 6-7	Mapas de evaporación media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca	140
Figura 6-8	Mapa de evaporación media total anual multianual para el departamento de Cundinamarca	141
Figura 6-9	Interpolación por vecinos naturales más cercanos de los coeficientes a nivel anual	142
Figura 6-10	Interpolación spline de los coeficientes a nivel anual	143
Figura 6-11	Interpolación por tendencia de los coeficientes a nivel anual	144
Figura 6-12	Mapa de coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ a nivel mensual para el departamento de Cundinamarca.....	145
Figura 6-13	Mapa de coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ a nivel anual para el departamento de Cundinamarca.....	146
Figura 6-14	Mapas de ETo media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca	147
Figura 6-15	Mapas de ETo media total anual multianual para el departamento de Cundinamarca	148

Índice de gráficas

Gráfica 5-1	Temporalidad de los registros diarios de evaporación	60
Gráfica 6-1	Valores P para la prueba Pettitt de las series de temperatura máxima utilizadas para el cálculo de ETo	105
Gráfica 6-2	Valores P para la prueba Pettitt de las series de temperatura mínima utilizadas para el cálculo de ETo	107
Gráfica 6-3	Valores P para la prueba Pettitt de las series de humedad relativa máxima utilizadas para el cálculo de ETo	109
Gráfica 6-4	Valores P para la prueba Pettitt de las series de humedad relativa media utilizadas para el cálculo de ETo	111
Gráfica 6-5	Valores P para la prueba Pettitt de las series de humedad relativa mínima utilizadas para el cálculo de ETo	113
Gráfica 6-6	Valores P para la prueba Pettitt de las series de velocidad del viento utilizadas para el cálculo de ETo	115
Gráfica 6-7	Valores P para la prueba Pettitt de las series de brillo solar utilizadas para el cálculo de ETo.....	117
Gráfica 6-8	Valores P para la prueba Pettitt de las series de ETo obtenidas.....	120
Gráfica 6-9	Valores P para la prueba Pettitt de las series de evaporación	122
Gráfica 6-10	Comparación entre la evaporación y la ETo con completitud de las series de las estaciones de Mesitas, La Esperanza, Simijaca y La Iberia.....	124
Gráfica 6-11	Comparación entre la evaporación y la ETo sin tratamiento de las series de las estaciones de Mesitas, La Esperanza, Simijaca y La Iberia.....	124
Gráfica 6-12	Comparación entre la evaporación (mm) y la ETo (mm) tratando las series de las estaciones de El Muña, San Miguel de Sema y Tabio.....	126
Gráfica 6-13	Comparación entre la evaporación (mm) y la ETo (mm) tratando las series de las estaciones consideradas en el estudio	127
Gráfica 6-14	Coeficientes de relación entre la evaporación y la ETo mensual multianual para el departamento de Cundinamarca	128
Gráfica 6-15	Prueba Pettitt para las series de temperatura media mensual multianual	133
Gráfica 6-16	Modelo de regresión de temperatura media anual multianual para el departamento de Cundinamarca.....	134

Gráfica 6-17	Prueba Pettitt para las series de evaporación media total mensual multianual	138
Gráfica 6-18	Modelo de regresión de la evaporación media total anual multianual para el departamento de Cundinamarca	139
Gráfica 9-1	Temporalidad de los registros mensuales de temperatura máxima	158
Gráfica 9-2	Temporalidad de los registros mensuales de temperatura mínima	159
Gráfica 9-3	Temporalidad de los registros de temperatura máxima empleados para el cálculo de la ETo	160
Gráfica 9-4	Porcentaje de datos faltantes de temperatura máxima empleados para el cálculo de la ETo	161
Gráfica 9-5	Temperatura máxima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	162
Gráfica 9-6	Temporalidad de los registros de temperatura mínima empleados para el cálculo de la ETo	163
Gráfica 9-7	Porcentaje de datos faltantes de temperatura mínima empleados para el cálculo de la ETo	164
Gráfica 9-8	Temperatura mínima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	165
Gráfica 9-9	Temporalidad de los registros de humedad relativa máxima empleados para el cálculo de la ETo	166
Gráfica 9-10	Porcentaje de datos faltantes de humedad relativa máxima empleados para el cálculo de la ETo	167
Gráfica 9-11	Humedad relativa máxima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	168
Gráfica 9-12	Temporalidad de los registros de humedad relativa mínima empleados para el cálculo de la ETo	169
Gráfica 9-13	Porcentaje de datos faltantes de humedad relativa mínima empleados para el cálculo de la ETo	170
Gráfica 9-14	Humedad relativa mínima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	171
Gráfica 9-15	Temporalidad de los registros de humedad relativa media empleados para el cálculo de la ETo	172

Gráfica 9-16	Porcentaje de datos faltantes de humedad relativa media empleados para el cálculo de la ETo	173
Gráfica 9-17	Humedad relativa media registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	174
Gráfica 9-18	Temporalidad de los registros de velocidad del viento empleados para el cálculo de la ETo	175
Gráfica 9-19	Porcentaje de datos faltantes de velocidad del viento empleados para el cálculo de la ETo	176
Gráfica 9-20	Velocidad del viento registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	177
Gráfica 9-21	Temporalidad de los registros de brillo solar empleados para el cálculo de la ETo	178
Gráfica 9-22	Porcentaje de datos faltantes de brillo solar empleados para el cálculo de la ETo	179
Gráfica 9-23	Brillo solar registrado en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo	180
Gráfica 9-24	Valores de temperatura máxima promedio	185
Gráfica 9-25	Prueba de Grubbs de las series de temperatura máxima empleadas para el cálculo de la ETo	188
Gráfica 9-26	Valores de temperatura mínima promedio	191
Gráfica 9-27	Prueba de Grubbs de las series de temperatura mínima empleadas para el cálculo de la ETo	194
Gráfica 9-28	Valores de humedad relativa máxima promedio	195
Gráfica 9-29	Prueba de Grubbs de las series de humedad relativa máxima empleadas para el cálculo de la ETo	195
Gráfica 9-30	Valores de humedad relativa media promedio	198
Gráfica 9-31	Prueba de Grubbs de las series de humedad relativa media empleadas para el cálculo de la ETo	201
Gráfica 9-32	Valores de humedad relativa mínima promedio	202
Gráfica 9-33	Prueba de Grubbs de las series de humedad relativa mínima empleadas para el cálculo de la ETo	202
Gráfica 9-34	Valores de velocidad del viento promedio	205

Gráfica 9-35	Prueba de Grubbs de las series de velocidad del viento empleadas para el cálculo de la ETo	208
Gráfica 9-36	Valores de brillo solar promedio.....	211
Gráfica 9-37	Prueba de Grubbs de las series de brillo solar empleadas para el cálculo de la ETo en el departamento de Cundinamarca	214
Gráfica 9-38	Valores de ETo promedio totales mensuales.....	217
Gráfica 9-39	Prueba de Grubbs de las series de ETo obtenidas	220
Gráfica 9-40	Valores de evaporación promedio totales mensuales	223
Gráfica 9-41	Prueba de Grubbs de las series de evaporación.....	226
Gráfica 9-42	Modelo de regresión de temperatura media mensual multianual para el departamento de Cundinamarca.....	230
Gráfica 9-43	Resultados de los modelos de regresión de la evaporación media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca.....	233

Índice de fotografías

Fotografía 4-1	Tanque de evaporación clase A.....	36
Fotografía 4-2	Tanque de evaporación automático clase A	37

Índice de anexos

9.1	Anexo 1. Información de las series climatológicas.....	158
9.2	Anexo 2. Shapes de las estaciones.....	181
9.3	Anexo 3. Imágenes	182
9.4	Anexo 4. Memorias del análisis estadístico de la información climatológica	183
9.5	Anexo 5. Memorias del cálculo de la ETo.....	227
9.6	Anexo 6. Relación entre evaporación y ETo.....	228
9.7	Anexo 7. Modelos de regresión para ajuste de regionalización	229
9.8	Anexo 8. Mapas de regionalización para el departamento de Cundinamarca.....	234

1 Introducción

El presente documento trata la “regionalización del cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) a escala mensual y anual para el departamento de Cundinamarca, a partir de los datos de evaporación del tanque clase A relacionados con los valores de ET_o obtenidos por el método de la FAO Penman-Monteith”. El concepto evapotranspiración de referencia ET_o fue establecido con el fin de estimar de forma más precisa la evapotranspiración en espacios que presentan algún tipo de cobertura vegetal (IDEAM, 2018). La ET_o se puede medir utilizando lisímetros o sensores atmosféricos altamente sensibles, pero es difícil de replicar y costoso.

La evapotranspiración es un elemento importante del ciclo hidrológico y balance de energía en la superficie terrestre, su conocimiento y estimación es determinante para la planeación de recursos hídricos y en lo particular, para el uso eficiente del agua de riego (López et al., 2015).

Debido a la difícil tarea para estimar la tasa de evapotranspiración, se han desarrollado ecuaciones empíricas que relacionan la evapotranspiración con datos meteorológicos. La mayoría de estas ecuaciones son para un cultivo estándar. De todos los modelos, el propuesto por la FAO 56 Penman-Monteith está considerado como el más físico y preciso (Lavado et al., 2015).

La Organización para la Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas (FAO), propuso la metodología FAO 56 basada en la evapotranspiración de referencia que se calcula con la ecuación FAO Penman-Monteith y un coeficiente de cultivo (K_c); siendo ampliamente utilizado debido a que ha arrojado resultados satisfactorios bajo diversas condiciones climáticas alrededor del mundo (López et al., 2015).

Sin embargo, debido a la cantidad de variables y datos que requiere para su aplicación que muy pocas veces están disponibles en su totalidad, se aplican otros métodos de diversas exigencias, y consecuentemente de distinta precisión.

Entonces, para afrontar las limitaciones de aplicación del método de la FAO Penman-Monteith en el departamento de Cundinamarca, se buscó regionalizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia, a partir de series de evaporación de tanque clase A

relacionándolas con los resultados de ETo obtenidos por la metodología de la FAO Penman-Monteith, de las estaciones con los registros climatológicos requeridos, con el fin de reducir el número de parámetros climáticos requeridos a temperatura y evaporación únicamente.

El área de aplicación, el departamento de Cundinamarca localizado en la región andina de Colombia se eligió debido a su importancia agrícola dentro de Colombia. Luego, se identificaron las estaciones del IDEAM y la CAR (cuya jurisdicción es el departamento de Cundinamarca) localizadas dentro del departamento y de las que tuvieran la información disponible se solicitaron las series de: evaporación, temperatura máxima y mínima; humedad relativa máxima, media y mínima; velocidad del viento y brillo solar.

Debido a la variabilidad espacial de las estaciones climáticas con información de evaporación y temperatura, se observaron las áreas con mayor densidad de estas, localizadas principalmente en el centro del departamento. Entre tanto, la cantidad de estaciones con registros de todos los parámetros requeridos por el método de la FAO Penman-Monteith fue menor, ubicándose exclusivamente en el centro y occidente de Cundinamarca.

Comparando las series de evaporación y ETo, se identificó que los registros mínimos de evaporación eran menores respecto a los valores mínimos calculados de ETo, conllevando a que la tendencia de dichos parámetros no fuera similar. Por ello se eliminaron los valores mínimos de evaporación hasta alcanzar los valores mínimos de ETo. Una vez hecho esto, se comprobó estadística y gráficamente que las dos variables climáticas para cada estación mostraban una tendencia muy parecida, lo que permitió extraer un coeficiente mensual y anual que las relaciona directamente.

Después, considerando la temperatura media para cada estación como el promedio entre la mínima y máxima, se evaluó un modelo que ajusta este parámetro con la altitud de forma lineal decreciente con una alta correlación. Con este modelo lineal y haciendo uso de un modelo digital de terreno (MDT), se elaboraron ráster de temperatura media mensual multianual y ráster de temperatura media anual multianual para el departamento de Cundinamarca.

Obtenida la temperatura media a nivel mensual y anual de cada estación, se procedió a evaluar su posible relación con las series totales mensuales y anuales de evaporación. Haciendo un análisis estadístico con distintos modelos de regresión, se encontró que para el departamento de Cundinamarca los modelos que mejor describen la evaporación son: funciones polinómicas de sexto, séptimo y noveno orden y la función de decaimiento exponencial.

Las regresiones anteriores en conjunto con los ráster de temperatura permitieron elaborar los ráster de evaporación. A su vez, se construyeron ráster usando el método de la distancia inversa ponderada (IDW) a escala mensual y anual con los “coeficientes de relación” entre la evaporación y evapotranspiración de referencia. Multiplicando los ráster de evaporación y coeficientes, se obtuvo los mapas de la ETo total mensual y anual esperada para el departamento de Cundinamarca.

Este documento contiene: el planteamiento del problema, donde se indican las razones del estudio; los objetivos, que muestran lo que se quiere lograr; el marco teórico, presenta la explicación de los conceptos claves: evaporación, transpiración y evapotranspiración de referencia; la metodología, indica el proceso necesario para cumplir los objetivos, desde el tratamiento de la información climatológica, los modelos de regresión y los modelos geoespaciales; los resultados, muestran el análisis de las series de tiempo, la ETo obtenida, los modelos de regresión entre altitud-temperatura- evaporación y, los mapas de los modelos geoespaciales; y por último, las conclusiones y recomendaciones, allí se consigna el análisis de los resultados, los inconvenientes presentados y las recomendaciones concernientes para la aplicación del estudio.

2 Planteamiento del problema

A pesar de que la adquisición de los datos climatológicos se ha facilitado gracias a los avances tecnológicos, siguen existiendo problemas con la información tales como: estaciones con muchos datos faltantes; baja densidad o mala distribución de las estaciones; y variables como humedad relativa, velocidad del viento o brillo solar disponibles en pocas estaciones o con pocos registros.

En este caso, la evapotranspiración de referencia (ET_o) que es un parámetro climático que se puede medir de manera directa con lisímetros, por ejemplo, los cuales no han sido utilizados ampliamente en Colombia y su aplicación no se ha extendido, recayendo el cálculo de la ET_o a los métodos teóricos.

La importancia de la ET_o está principalmente en la estimación de las necesidades de agua de un cultivo; ya que es un componente fundamental del balance hídrico, permitiendo valorar la posibilidad de extracción de agua de una fuente hídrica o indicando cuánto y cuándo se debe regar.

En Colombia, el IDEAM realizó un estudio donde concluyó que el método de la FAO Penman-Monteith es el más apropiado para calcular la ET_o en Colombia (IDEAM, 2018). Para emplearlo se requiere de registros de: temperatura, humedad relativa, brillo o radiación solar y velocidad del viento.

Sin embargo, como ya se mencionó, la falta de registros o estaciones imposibilita usar el método de la FAO Penman-Monteith para muchas zonas de Cundinamarca, lo que conlleva a implementar metodologías que dependen de menos variables pero cuyos resultados pueden ser poco confiables, porque fueron desarrolladas para zonas en específico, limitando su aplicabilidad dentro del departamento.

Entonces, el problema a resolver es ¿Cómo facilitar el cálculo de la ET_o a escala mensual y anual para el departamento de Cundinamarca, cuando no se dispone de información climatológica?

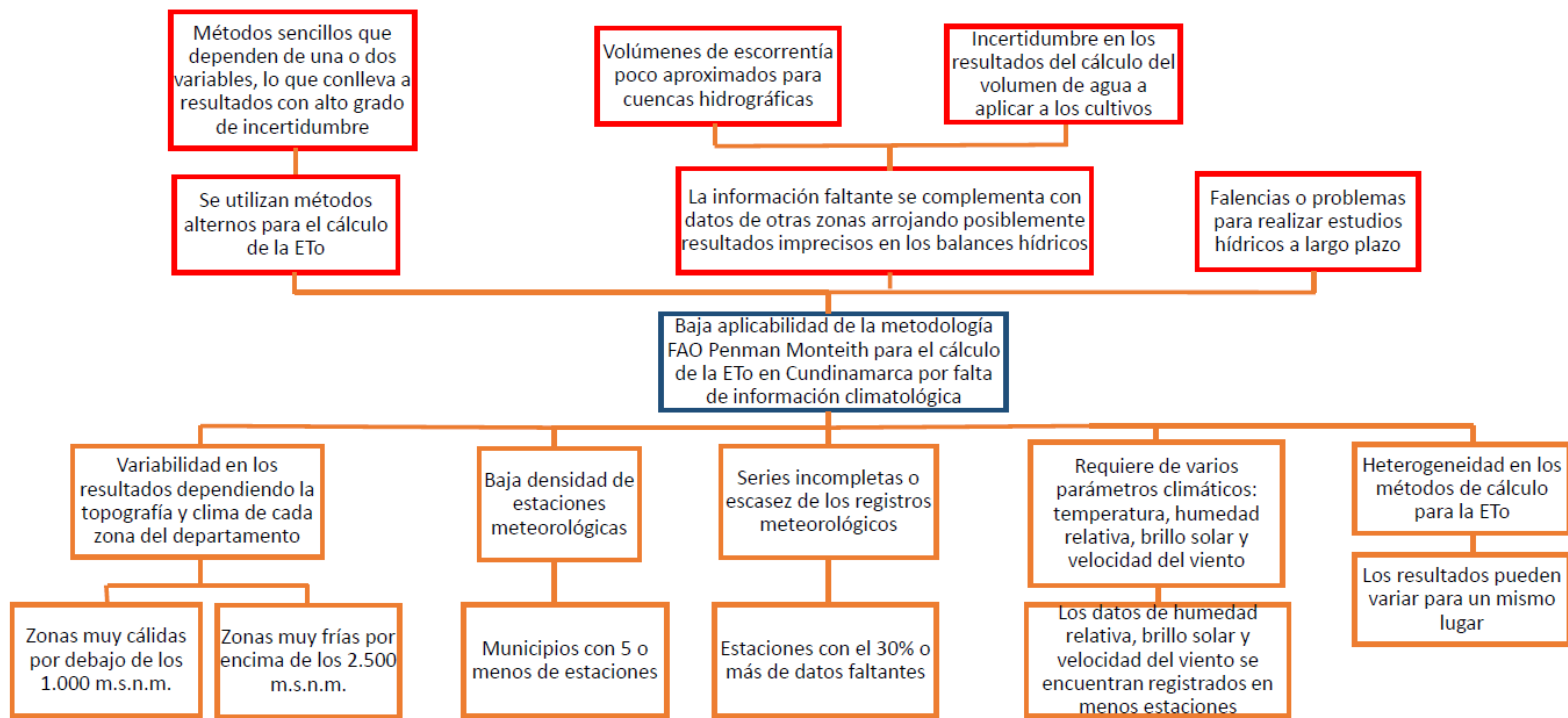


Figura 2-1 Árbol del problema para el cálculo de la ETo en Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Regionalizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) a escala mensual y anual para el departamento de Cundinamarca, a partir de series de evaporación de tanque clase A relacionadas con los resultados obtenidos de ET_o por el método de la FAO Penman-Monteith.

3.2 Objetivos específicos

- Recopilar los registros existentes de las estaciones con información de evaporación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento en el departamento de Cundinamarca.
- Realizar el análisis estadístico de los datos climatológicos.
- Estructurar un modelo de regresión con los datos de altitud, temperatura media mensual y anual y, la evaporación total mensual y anual, de tal manera que se pueda hacer el cálculo de la temperatura media y evaporación para el departamento de Cundinamarca.
- Elaborar un modelo geoespacial que relacione la altitud-temperatura media, para obtener la temperatura a nivel mensual y anual en cualquier lugar del departamento de Cundinamarca.
- Construir un modelo geoespacial que relacione la altitud-temperatura- evaporación, para obtener la evaporación total mensual promedio y total anual promedio en cualquier lugar del departamento de Cundinamarca.
- Contrastar los datos total mensual promedio de evaporación de tanque clase A con los resultados de la ET_o obtenida por la metodología de la FAO Penman-Monteith.
- Encontrar la relación a nivel mensual y anual, entre la evaporación de tanque clase A registrada, con la ET_o estimada por la metodología de la FAO Penman-Monteith.
- Establecer una metodología que pueda ser replicada en diferentes lugares de Colombia.

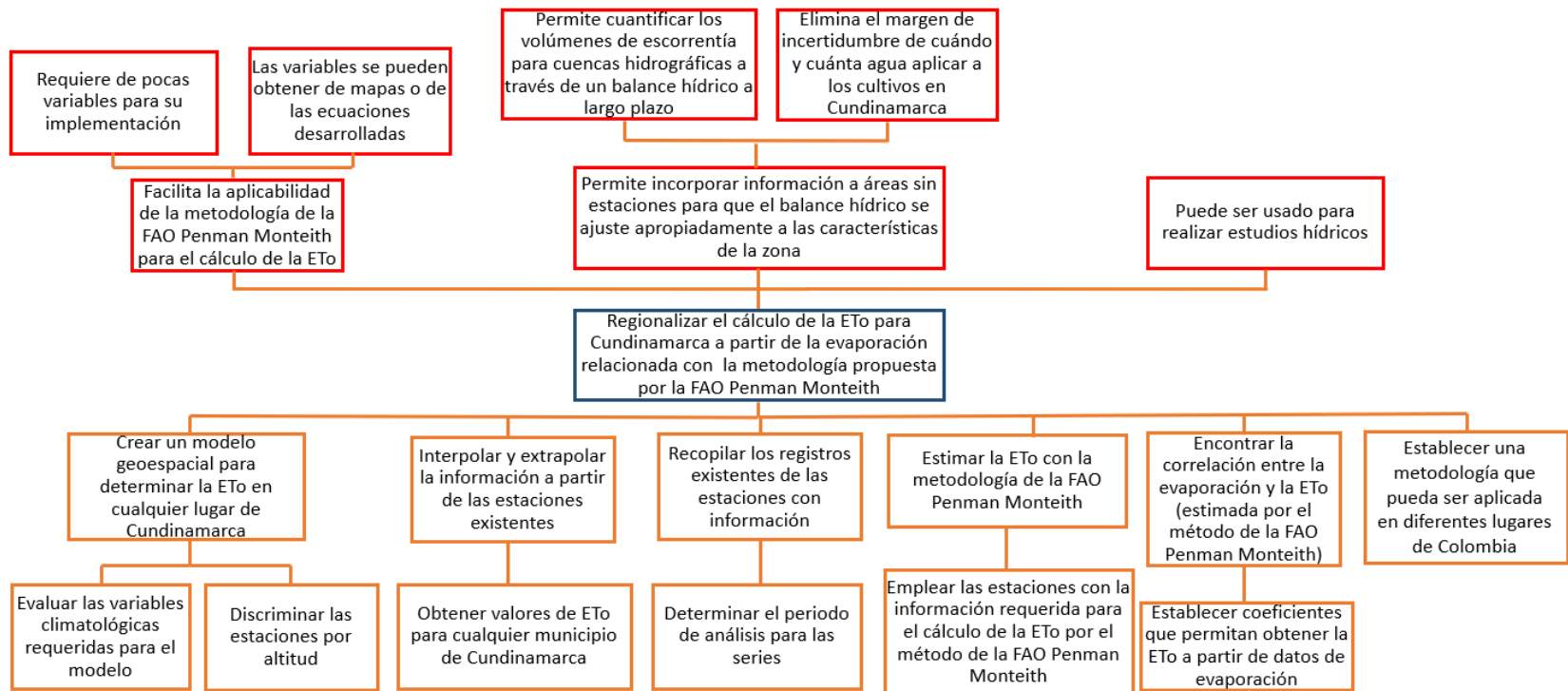


Figura 3-1 Árbol de objetivos para el cálculo de la ETo en Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

4 Marco teórico

Partiendo del alcance de la investigación, el marco teórico de referencia abarca los medios necesarios para lograr los objetivos de este estudio. Para ello aborda una breve descripción del departamento de Cundinamarca e indica qué es y qué representa la evapotranspiración de referencia.

4.1 Descripción del área de estudio

El departamento de Cundinamarca, perteneciente a la república de Colombia, es uno de los 32 que conforman este país y tiene un área de 24.120 km². Su capital es la ciudad de Bogotá (aunque no hace parte de su régimen administrativo) y está dividido política y administrativamente en 116 municipios.

Cundinamarca limita al norte con el departamento de Boyacá; al oriente con los departamentos de Boyacá y Meta; al sur con los departamentos del Meta, Huila y Tolima y, al occidente con el río Magdalena, que lo separa de los departamentos del Tolima y Caldas.

De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, Cundinamarca tiene una población de 2.919.060 habitantes, ubicándola como el cuarto departamento más poblado del país.

En cuanto a la evolución de la actividad económica de manera desagregada, con base en la información del DANE, se aprecia que la economía de la región es cada vez más urbana, de modo que van ganando peso las actividades relacionadas con industria, construcción y servicios. Las actividades de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, que en el 2006 constituían el 17% de la actividad económica departamental, para el 2018 alcanzaron apenas el 12,5%, esto es un descenso de 5 puntos porcentuales en 12 años.

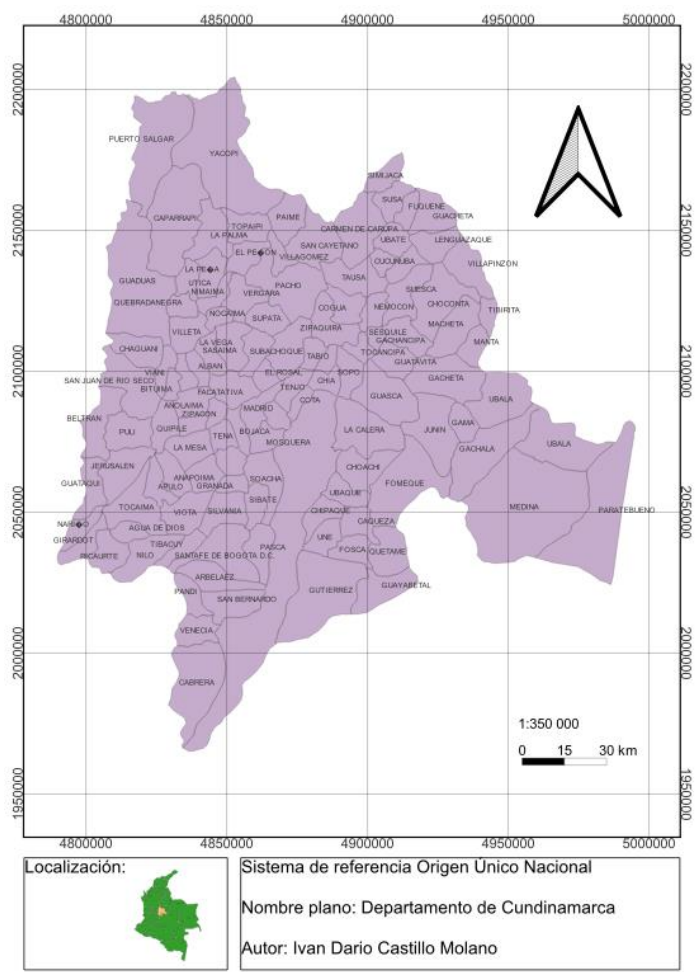


Figura 4-1 División política del departamento de Cundinamarca
Fuente: Autor, 2023.

Según el plan departamental de desarrollo 2020-2024, la gran mayoría del área de Cundinamarca es considerada rural, incluyendo suelos de protección y conservación, así como áreas de importancia estratégica en términos ambientales. De acuerdo con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, el área total de Cundinamarca es de 22.779 km² (sin incluir Bogotá), y las áreas rurales alcanzan los 22.587 km², un amplio 99,2% del territorio de la región. Las áreas urbanas ocupan unos 191 km², apenas el 0,8% del área total.

Cundinamarca tiene el primer lugar nacional en cuatro cultivos (papa, zanahoria, mango, lechuga), que son también los de mayor producción dentro de su territorio, es el segundo mayor productor nacional de caña panelera y el tercero de cebolla.

4.2 Evaporación

Proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando a la atmósfera en forma de vapor. Los factores que influyen en el proceso de la evaporación son la radiación solar y, en menor grado, la temperatura del aire, proporcionan la energía que emplean las moléculas de agua para producir este cambio de estado. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la velocidad del viento y la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua en la atmósfera circundante. Esta diferencia se denomina déficit higrométrico.

Teniendo en cuenta lo descrito por López (2011), a medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente de agua y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera. El reemplazo del aire saturado por aire más seco depende de la velocidad del viento. Así, la evaporación es proporcional al déficit de tensión de vapor entre el aire saturado (a la temperatura del agua) y la tensión de vapor en el aire. Si el aire saturado no es reemplazado, no sólo disminuye la evaporación, sino que se ve incrementada la condensación y el retorno de las moléculas de agua al estado líquido.

Todo tipo de agua en la superficie terrestre está expuesta a la evaporación. La evaporación se favorecerá cuanto mayor sea la cantidad de agua con disponibilidad de evaporarse y mayor la insaturación del aire que envuelve a la superficie evaporante (López, 2011).

4.2.1 Factores que influyen en la evaporación

Principalmente se pueden distinguir tres: factores meteorológicos, calidad del agua y la naturaleza y el estado de la superficie de evaporación.

4.2.1.1 Factores meteorológicos

1. Déficit higrométrico o déficit de saturación de la atmósfera.

2. Temperatura del aire. La evaporación crece con un aumento de la temperatura del agua o de la superficie de evaporación, para un mismo contenido de humedad relativa. La temperatura del agua varía en el mismo sentido que la del aire.

3. Radiación solar. La energía utilizada en la evaporación tiene como fuente principal la radiación solar. Parte de ésta se emplea en calentar el suelo y el aire, y otra parte es empleada en el proceso de evaporación (López, 2011).

4. Velocidad del viento. Asegura el reemplazo del aire más o menos saturado que está en contacto con la superficie de evaporación, por uno que tiene generalmente una temperatura y humedad más bajas.

5. Presión barométrica. La evaporación aumenta cuando la presión disminuye.

4.2.1.2 Calidad del agua

La evaporación disminuye a medida que la concentración de sal aumenta en la superficie evaporante.

4.2.1.3 Naturaleza y estado de la superficie de evaporación

Todas las superficies capaces de interceptar precipitación son fuentes potenciales de evaporación.

1. Superficie de agua libre.
2. Nieve.
3. Hielo.
4. Suelo desnudo.
5. Vegetación.

4.2.2 Medición de la evaporación

Algunos aparatos para la medición directa de la evaporación son:

4.2.2.1 *Cuerpo de porcelana porosa*

Están constituidos por esferas, cilindros o placas de porcelana blanca porosa. La manera de medir la evaporación es midiendo la cantidad de agua que pasa del cilindro al envase poroso, ya que este último se satura y genera la evaporación. Es alimentado constantemente por el cilindro que contiene agua.

4.2.2.2 *Superficie de papel húmedo o evaporímetro PICHE*

Está constituido por un tubo cilíndrico de vidrio de 25 cm de largo y 1,5 cm de diámetro, graduado, encerrado en su parte superior, mientras que en la inferior se cierra con una hoja circular de papel filtro normalizada de 30 mm de diámetro y 0,5 mm de espesor, fijada por capilaridad y mantenida por un resorte.

El aparato se llena de agua destilada, la cual, al irse evaporizando a través del papel de filtro, va bajando en el cilindro. Se puede así medir la cantidad de agua evaporada a través de las diferencias entre las lecturas.

La desventaja que tiene es no tomar en cuenta la influencia de la insolación, ya que se instala bajo abrigo, también aislándolo de la influencia de la precipitación.

4.2.2.3 *Evaporímetro de Balanza*

Consiste en un recipiente con agua depositado sobre una balanza que registra, por diferencia de peso, el agua perdida por evaporación. Presenta como desventaja la influencia, sobre la medición realizada, del calentamiento de las paredes y entre sus ventajas puede mencionarse la posibilidad de realizar un registro continuo por medio de un evaporígrafo.

4.2.2.4 *Tanque de evaporación*

López (2011) afirma que la evaporación es medida monitoreando la pérdida de agua en un tanque durante un determinado período de tiempo. La frecuencia de la medición generalmente es diaria. Provee una medida del efecto integrado de la radiación, el viento, la temperatura y la humedad, sobre la evaporación desde una superficie abierta.

Los tanques de evaporación son los instrumentos de medición más empleados, y varían ampliamente en forma, medida y material. Según su ubicación, los tanques se clasifican en:

- Exteriores: El tanque Clase A es circular, 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. Está construido de hierro galvanizado o de láminas de metal (0,8 mm). El tanque se sitúa sobre una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15 cm por encima del nivel del suelo. El tanque debe estar a nivel. Una vez instalado, el tanque se llena con agua hasta 5 cm por debajo del borde y el nivel del agua no debe disminuir hasta más de 7,5 cm por debajo del borde. El agua debe ser regularmente cambiada, al menos semanalmente, para eliminar la turbidez. Si el tanque es galvanizado, debe ser pintado anualmente con pintura de aluminio (Doorenbos & Pruitt, 1977).

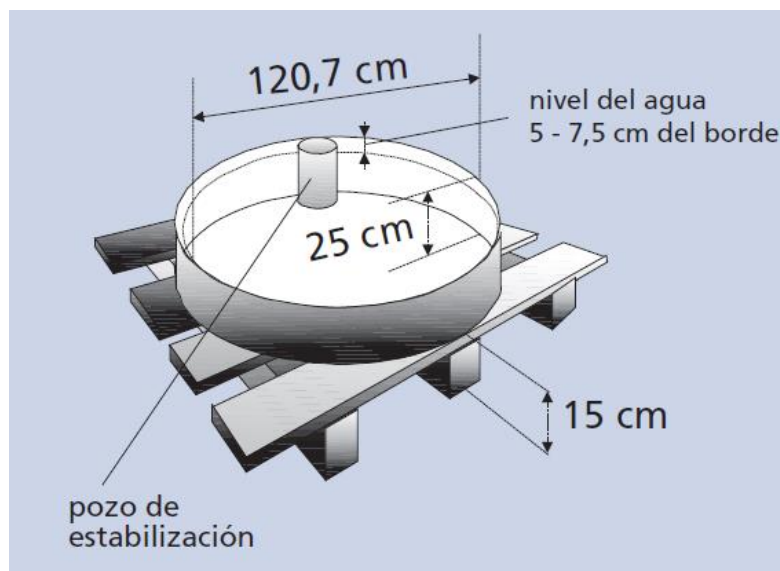


Figura 4-2 Esquema del tanque evaporímetro clase A

Fuente: Allen, 2006.

El tanque evaporímetro clase A es muy utilizado en zonas agrícolas para planificar la aplicación del agua de riego, debido a que mide el efecto integrado del clima, es de fácil lectura y es muy económico (Allen et al., 2006).

Se recomienda que el tanque cuente con otros instrumentos (ver Fotografía 4-1), como los anemógrafos o anemómetros integrados, los medidores de precipitación no registradores, los termómetros o los termógrafos en el caso de la temperatura del agua, los termómetros

de máxima y mínima o los termógrafos en el caso de la temperatura, o los higrótermógrafos o higrómetros (OMM, 2020).



Fotografía 4-1 Tanque de evaporación clase A

Fuente: IDEAM, 2017.

Actualmente y como se presenta en la Fotografía 4-2, el IDEAM utiliza un tanque de evaporación dotado de un sensor que se monta en un pocillo tranquilizador para medir la altura de la capa superficial del agua en el tanque, obteniendo la cantidad de agua evaporada entre diferentes lecturas, pudiendo detectar variaciones de altura de décimas de milímetro. La información es enviada a un datalogger que transmite la información a una base de datos (IDEAM, 2017).



Fotografía 4-2 Tanque de evaporación automático clase A

Fuente: IDEAM, 2017.

La ETo también se puede estimar también de la evaporación del tanque evaporímetro clase A. Los tanques han probado su valor práctico y han sido utilizados con éxito para estimar ETo observando la evaporación del tanque y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con la ETo (Allen et al., 2006).

$$ETo = Kp * Ev \quad (1)$$

Donde Kp es el coeficiente del tanque evaporímetro y Ev la evaporación del tanque en mm/día.

- Enterrados: Este tipo de tanques es menos sensible a la temperatura de las paredes, pero, sin embargo, lo es a variaciones de la radiación solar. El borde se encuentra 12 cm por encima del suelo. Como desventajas pueden mencionarse su difícil reposición y limpieza, como así también el error que ocasionan las gotas de lluvia y los sedimentos.

- Flotantes: Se emplean para medir la evaporación de grandes extensiones de agua, por ejemplo, lagos y ríos. Están elevados sobre la superficie del agua a una distancia de 7 a 10 cm.

Teniendo en cuenta los objetivos planteados en este trabajo, se utilizan las mediciones en tanque de evaporación exterior clase A, con el fin de contrastar los registros versus los cálculos de la evapotranspiración de referencia por el método de la FAO Penman-Monteith.

4.2.3 Métodos teóricos para el cálculo de la evaporación

4.2.3.1 Balance hídrico

Consiste en establecer una igualdad entre las entradas y salidas de agua en una zona concreta. La dificultad del método reside en la medida exacta de las distintas componentes del balance, con lo cual los resultados de evaporación pueden estar muy alejados de los verdaderos.

En un intervalo de tiempo debe cumplirse

$$E = A - G \pm \Delta R \quad (2)$$

donde E es la evaporación en dicho intervalo, A es la aportación de agua a la zona (principalmente precipitaciones), G es la salida de agua (infiltraciones, escorrentía) y ΔR la variación en el almacenaje de agua en la zona.

4.2.3.2 Balance energético

La cantidad de agua que puede evaporarse depende fundamentalmente de la energía disponible, por ello se establece un balance energético en el agua. Meinzer calcula la evaporación en un intervalo de tiempo con la siguiente expresión:

$$E = \frac{R_i - R_r - C_a - C}{C_1(1 + \beta)} \quad (3)$$

donde E es la evaporación en cm, R_i es la radiación global incidente sobre una superficie horizontal (cal/cm^2), R_r es la radiación total reflejada (cal/cm^2), C_a es el calor almacenado en el agua (cal/cm^2), considerando toda la profundidad del agua, C es la pérdida de calor hacia el terreno circundante o por otras causas (cal/cm^2), C_1 es el calor latente de vaporización (cal/cm^3) que varía con la temperatura (585 cal/cm^3 a 15°C) y β es la relación de Bowen:

$$\beta = \frac{0,6 * 10^{-3} * (T_s - T) * P_a}{e_a - P_v} \quad (4)$$

donde T_s es la temperatura superficial del agua en °C, T es la temperatura del aire en °C, e_a es la tensión de vapor saturante en mm de Hg a la temperatura T , P_v es la presión de vapor en mm de Hg y P_a es la presión atmosférica en mm de Hg.

La aplicación del método está muy limitada pues exige conocer medidas como R_r y C difíciles de obtener con precisión.

4.2.3.3 Método aerodinámico

En este método se relaciona la evaporación con los gradientes de humedad y de la velocidad del viento. Pasquill y Rider expresan la intensidad de evaporación con la siguiente expresión:

$$I_e = \frac{6,52 * (U_2 - U_1) * (P_1 - P_2)}{(T + 273) * \left[\ln \left(\frac{z_1}{z_2} \right) \right]} \quad (5)$$

donde I_e es la intensidad de evaporación (mm/h), U_2-U_1 es la diferencia de velocidades del viento a alturas z_2 y z_1 (m/s), P_1-P_2 es la diferencia de las presiones de vapor en el aire a alturas z_1 y z_2 (mm de Hg) respectivamente, y T es la temperatura media del aire en °C $((T_1+T_2) / 2)$.

4.2.4 Cálculo de la evaporación

Relacionan la evaporación con algunos factores que influyen en el fenómeno con coeficientes empíricos ajustados. Las fórmulas se pueden englobar en dos tipos distintos: las que se basan en la ley de Dalton y otras que son semiempíricas.

4.2.4.1 Fórmula de Meyer

$$E_m = K * (e_a - P_v) * \left(1 + \frac{V}{10} \right) \quad (6)$$

donde E_m es la evaporación media mensual en pulgadas, e_a es la tensión de vapor saturante correspondiente a la temperatura media mensual del aire (en pulgadas de Hg), P_v es la presión de vapor en el aire (en pulgadas de Hg), V es la velocidad media mensual

del viento (en millas por hora) medido a una altura de 25 pies y K es un coeficiente empírico que vale 15 para tanques de evaporación o masas de agua poco profundas y 11 para depósitos y lagos profundos.

4.2.4.2 *Fórmula de Lugeon*

$$E_m = 0,398 * n * (e_a - P_v) * \left(\frac{273 + T}{273}\right) * \left(\frac{760}{P_a - e_a}\right) \quad (7)$$

donde E_m es la evaporación mensual en mm, n es el número de días del mes, e_a es la tensión de vapor saturante correspondiente a la temperatura media mensual del aire (en mm de Hg), P_v es la presión de vapor en el aire (en mm de Hg), P_a es la presión atmosférica media diaria (en mm de Hg) y T es la temperatura media mensual de las temperaturas máximas registradas en °C.

4.2.4.3 *Fórmula de Coutagne*

$$E = \theta * (1 + \alpha * V) \quad (8)$$

donde E es la evaporación diaria en mm, θ es el valor medio diario de la diferencia psicrométrica en °C (diferencia que marca el psicrómetro al medir la humedad de la atmósfera), V es la velocidad media diaria del viento en m/s y α es un coeficiente que varía entre 0,1 y 0,15.

4.3 Transpiración

Es el proceso físico-biológico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso a través del metabolismo de las plantas y pasa a la atmósfera. Esencialmente es el mismo proceso físico que la evaporación, excepto que la superficie desde la cual se escapan las moléculas del líquido no es de agua libre, sino que es la superficie de las hojas. Éstas están compuestas por finas capas de células (mesodermo) y poseen una delgada epidermis de una célula de espesor, la cual posee muchos estomas.

Contrariamente a lo que se cree, el control que ejercen los estomas sobre las tasas de transpiración es muy limitado. Ellos se cierran cuando la oscuridad o la marchitez comienza. Cuando los estomas están completamente abiertos, la tasa de transpiración está

determinada por los mismos factores que controlan la evaporación. Los estomas ejercen una suave regulación solamente cuando están cerrados.

4.3.1 Factores que influyen en la transpiración

4.3.1.1 Factores fisiológicos

Depende del tipo de planta, es decir, será función del número y del tipo de estoma, extensión y características de la capa protectora y estructura de la hoja.

4.3.1.2 Factores ambientales

1. Temperatura.
2. Humedad de la atmosfera.
3. Velocidad del viento.
4. Insolación.
5. Humedad del suelo.

4.3.2 Medición de la transpiración

Se clasifican en tres categorías.

1. Procedimientos basados en la medición directa del vapor de agua transpirado.
2. Procedimientos basados en la medida del cambio de peso de la planta y del terreno que alimenta.
3. Procedimientos basados en la medición de cantidad de agua necesaria para la alimentación de la planta y de su transpiración.

La intensidad de la transpiración es función de la humedad del suelo, en la zona de raíces y se anula cuando el contenido de humedad es menor al punto de marchitez permanente, el cual indica el momento en que el contenido de humedad del suelo no puede ser absorbido por las plantas.

4.4 Evapotranspiración

Del agua que una planta absorbe del suelo sólo una parte se queda para formar los tejidos de la planta; el resto regresa a la atmósfera en forma de vapor, configurando la transpiración. Este fenómeno de la transpiración constituye una fase muy importante del ciclo hidrológico, porque es el mecanismo principal por medio del cual el agua precipitada a tierra regresa a la atmósfera.

Al estudiar el balance hídrico de una cuenca, el interés recae en la determinación de las pérdidas totales de agua, es decir por evaporación y por transpiración. Además, desde el punto de vista práctico es muy difícil evaluar por separado cada pérdida. Las pérdidas totales de agua constituyen la evapotranspiración.

El término evapotranspiración potencial (ETP) fue introducido por Thornthwaite como la pérdida total de agua que ocurriría si en ningún momento existiera deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación.

Se define uso consuntivo la suma de la evapotranspiración y el agua utilizada directamente para construir los tejidos de las plantas. La distinción entre los términos ETP y uso consuntivo es más que todo académica, porque las diferencias numéricas caen siempre dentro de los errores de medición y por lo común se tratan como términos sinónimos.

En los proyectos de irrigación interesa hacer un cálculo previo de las necesidades de agua de los cultivos. Estas necesidades de agua, que van a ser satisfechas mediante el riego, vienen a constituir la evapotranspiración o el uso consuntivo.

En el documento “análisis de los métodos de estimación de evaporación y evapotranspiración a las condiciones locales de la ciudad de Córdoba”, López (2011) indica que en investigaciones se observó que el valor de la ETP no representa la capacidad evaporativa máxima, y se comprobó que, en zonas áridas y semiáridas, la evapotranspiración en algunos cultivos de mayor porte (tales como el maíz, el girasol, la alfalfa y el sorgo, entre otros) es superior a la estimada con la evapotranspiración medida en césped. Esto llevó a la introducción del concepto de evapotranspiración de referencia (ETo), reduciendo las ambigüedades de interpretación a las que da lugar el concepto de evapotranspiración y permitiendo de forma más directa relacionarlo con los requerimientos

de agua de los cultivos específicos. El concepto de ETo es similar al de ETP, pero se diferencia en que la evapotranspiración de referencia es aplicada a un cultivo específico, estándar o de referencia.

La ETo estandarizada es la cantidad de agua evaporada desde una superficie de terreno cubierto totalmente con un cultivo hipotético de 12 cm de altura, con una resistencia superficial de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$, un albedo de 0,23 y sin restricciones de agua; este valor representa la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, en crecimiento activo y con riego adecuado (Jaramillo, 2006).

4.4.1 Factores que influyen en la evapotranspiración

La evapotranspiración depende de numerosos factores meteorológicos, entre ellos la radiación solar como la fuente de energía fundamental para el desarrollo del proceso, la temperatura del aire como consecuencia de la anterior, la humedad relativa como medida de la capacidad evaporativa del ambiente y de la velocidad del viento que remueve constantemente el agua desde la superficie evaporante y transporta, en ocasiones, calor para mantener activo el proceso; pero, además, depende de las características de la vegetación del área, su tipo, densidad y estado de crecimiento, como también del suelo, sus propiedades y su contenido de humedad (Sánchez, Carvacho, 2011).

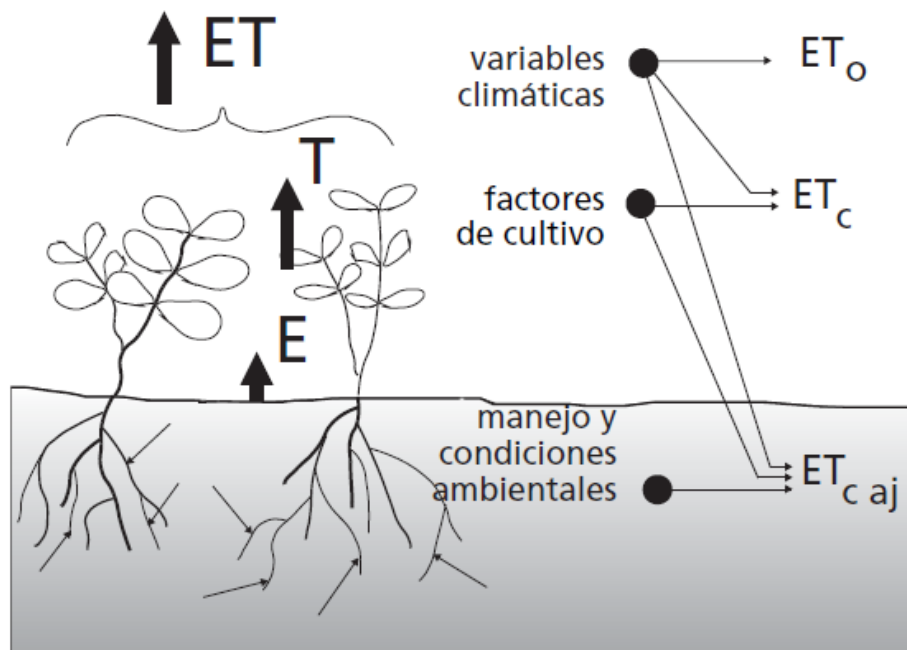


Figura 4-3 Factores que afectan la evapotranspiración

Fuente: Allen, 2006.

4.4.2 Medición de la evapotranspiración

Según la Organización Meteorológica Mundial OMM (2020), los evaporímetros de suelo y los lisímetros pueden clasificarse atendiendo a su modo de funcionamiento:

a) Por peso, que utilizan balanzas mecánicas para reflejar los cambios del contenido de agua; b) por hidráulica, basados en el principio hidrostático de pesada; y c) por volumetría, que mantienen constante el contenido de agua, midiendo la evapotranspiración en términos de la cantidad de agua agregada o extraída. Sin embargo, no existe un único instrumento estándar para medir la evapotranspiración.

De acuerdo con el curso “hidrología superficial y subterránea” de la Universidad da Coruña del año 2018, en el capítulo 4 “Evaporación y transpiración. Evapotranspiración”, se explica que la evapotranspiración en suelos se puede realizar con diferentes dispositivos como son:

a) Evapotranspirómetros: La ecuación del balance de masa en un suelo cubierto de vegetación se puede escribir:

$$ET = A - G - \Delta R \quad (9)$$

donde ET es la evapotranspiración, A son las aportaciones o ingresos de agua, G son las salidas o gastos de agua excepto los correspondientes a la evapotranspiración y ΔR es la variación en la reserva de agua del suelo.

El evapotranspirómetro es un dispositivo que puede hacer medidas directas de evapotranspiración potencial a partir de la anterior ecuación. Consiste en uno o más depósitos excavados en el terreno y rellenos con el producto de la excavación. En la superficie se planta un césped vegetal continuo. En el fondo del depósito existe un tubo colector que recoge las salidas G a un depósito donde se miden.

Los aportes A procedentes de la precipitación se miden con un pluviómetro, y los aportes de riego se conocen, éstos sirven para mantener el suelo con la humedad suficiente correspondiente a la capacidad de campo o retención de este, con lo cual la variación de la reserva de agua del suelo es nula. De este modo se conocen los valores de las variables del segundo término de la ecuación (9), y, en consecuencia, ET. El intervalo de medidas suele ser de un día.

b) Lisímetros: Se muestra un esquema en la Figura 4-4 y básicamente son depósitos de paredes verticales, abiertos en su parte superior, igual que los evapotranspirómetros, pero en este caso la variación de la reserva del suelo no es nula, por lo que se mide es la evapotranspiración real (ETR). Los intervalos de tiempo en la medida pueden ser tan pequeños como se quiera, siempre y cuando se pueda estimar adecuadamente ΔR .

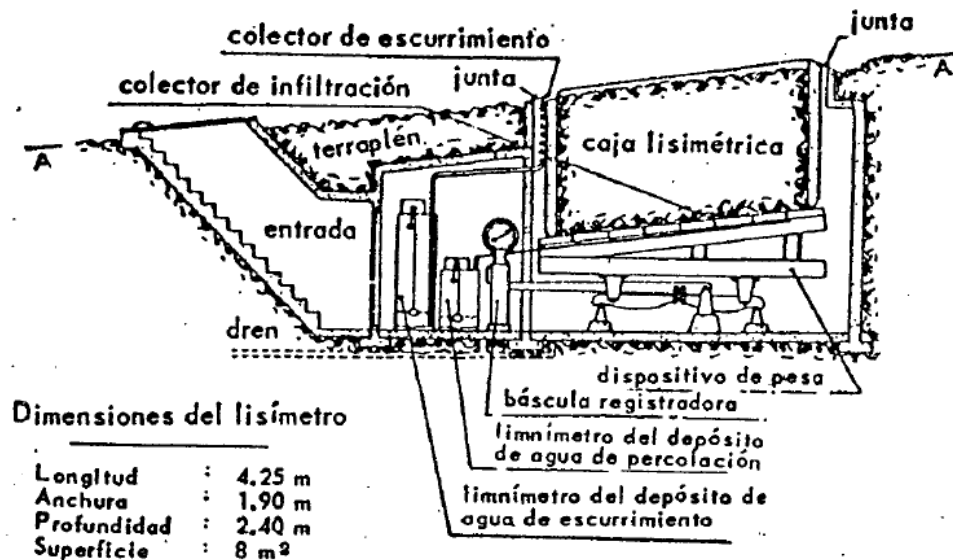


Figura 4-4 Esquema de un lisímetro

Fuente: Barrios, 2013.

Para medir ΔR se puede, o bien tomar muestras a distintos niveles en el lisímetro y determinación de su humedad, o bien situar el lisímetro sobre una gran báscula y deducir ΔR por la diferencia existente entre dos pesadas sucesivas. Estos lisímetros de báscula permiten determinaciones de la Evapotranspiración real en intervalos muy cortos (una hora o menos).

Sánchez (2002) indica que próximo a él debe existir un pluviómetro y que se despeja ETR de la ecuación (10) que expresa el balance hídrico en el lisímetro:

$$\text{Precipitaciones} = \text{ETR} + \text{Infiltración} + \Delta \text{almacenamiento} \quad (10)$$

Normalmente dispone de bordes que impiden la escorrentía superficial, pero a veces también se recoge y se incluye en el balance. La única medida compleja es el cambio en el almacenamiento (Δ almacenamiento). Para medir la ETP, es más simple, a través de riego, manteniendo el suelo en condiciones óptimas de humedad, y el cálculo ahora sería despejando ETP en esta expresión:

$$\text{Precipitaciones} + \text{Riego} = \text{ETP} + \text{Infiltración} \quad (11)$$

En este caso, ya no hay Δ almacenamiento, puesto que dicho almacenamiento está siempre completo.

Un lisímetro es difícilmente representativo de toda la región. En ocasiones se establece el balance hídrico en una parcela experimental, en la que se miden precipitaciones, escorrentía superficial, variaciones de la humedad en el suelo, para despejar finalmente la ET. Sería un procedimiento más exacto, pero más costoso y complicado (Sánchez, 2002).

c) Parcelas y cuencas experimentales: Son superficies de algunos centenares de metros cuadrados en las que se miden las precipitaciones y la humedad del suelo en distintos puntos y a distintas profundidades. El cálculo de la Evapotranspiración se hace a partir de un balance hidrológico. El gran problema que hay es que puede existir flujo subterráneo procedente del exterior de la parcela, por ello, se suele impermeabilizar.

4.4.3 Cálculo de la evapotranspiración

Remenieras (1974) afirma que ciertas fórmulas para el cálculo de la ETP, en la práctica puede ser asimilada a la capacidad de evaporación de la atmósfera. La noción de ETP se usa cada vez más para la evaluación de la necesidad de agua de regadío y las investigaciones sistemáticas han demostrado que:

- La evapotranspiración desde una cubierta vegetal, sostenida por un suelo bien provisto de agua, depende, en lo fundamental, de los factores meteorológicos y varía bastante poco con el carácter del suelo y especies o variedades de vegetación.
- En estas condiciones, la cantidad de agua evaporada es muy cercana a la observada en un manto de agua libre de poca profundidad, situado en el mismo sitio, es decir, a la ETP definida.
- El rendimiento máximo a los cultivos se realiza, con todas las otras condiciones constantes cuando, permanentemente, su abastecimiento de agua, compuesto por:
 - las precipitaciones.
 - reservas de humedad en el suelo.
 - aporte complementario de riego es igual a la ETP.

4.4.3.1 *Fórmula de Thornthwaite*

Se basa en numerosos experimentos efectuados con los lisímetros. La ETP se da por la relación:

$$ETP = 1,6 * \left(10 \frac{t}{I}\right)^a \quad (12)$$

donde ETP es la evapotranspiración potencial mensual en cm, para un mes ficticio de 30 días y una insolación teórica durante 12 de las 24 horas del día, t es la temperatura media mensual en °C para el mes considerado, I y a son las funciones del índice térmico anual (constantes para un lugar dado), a se calcula partiendo del índice térmico mensual dado por la fórmula:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (13)$$

El índice anual I corresponde a:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_j \quad (14)$$

Entonces a se expresa como (Monsalve, 2014):

$$a = 0,675 * 10^{-6}I^3 - 0,771 * 10^{-4}I^2 + 1,792 * 10^{-2}I + 0,49 \quad (15)$$

4.4.3.2 *Fórmula de Penman*

La fórmula semiempírica más conocida es la propuesta por Penman. La versión original del método fue propuesta por Penman en 1963. La ETP en mm/mes viene dada por la siguiente expresión:

$$ETP = E * f * d \quad (16)$$

donde E es la evaporación en superficie de agua libre en mm/d, f es un coeficiente reductor correspondiente al mes de que se trate y d el número de días del mes.

Los datos que se necesitan para calcular la evaporación son la latitud de la estación, las horas de insolación n, la temperatura Ta, la velocidad del viento a dos metros sobre la superficie evaporante v2 y la humedad relativa HR.

4.4.3.3 *Fórmula de Blaney Criddle*

A partir de ensayos efectuados desde 1931 en zonas áridas y semiáridas, formularon la capacidad evaporante de la atmósfera considerada como proporcional al producto t de la temperatura media mensual en °C por el porcentaje p de horas del día¹ durante el periodo en cuestión, expresado en % del número de horas del día del año (Remenieras, 1974).

Criddle agregó en 1953, un término de corrección que tiene en cuenta la influencia de la capacidad de retención del suelo y su profundidad húmeda.

La fórmula propuesta por estos autores para evaluar las necesidades mensuales de agua de algunas plantas cultivadas en Israel (Remeneiras, 1974):

$$ETP = \frac{kp}{100} * (45,7 * t + 813) \quad (17)$$

Donde ETP es la evapotranspiración mensual en mm, k es un coeficiente mensual que caracteriza la cobertura vegetal, t es la temperatura media mensual en °C y p es el número de horas del día del mes, expresado en % respecto del número de horas del día del año.

4.4.3.4 *Fórmula de Turc*

Propuso una fórmula de la ETP en función de la insolación y de la temperatura:

- Cuando la humedad relativa es mayor a 50%:

$$ETP = 0,4 * (I_g + 50) * \left(\frac{t}{t + 15}\right) \quad (18)$$

Donde ETP se expresa en mm, I_g es la radiación solar global del mes considerado en cal/(cm²día) y t la temperatura media mensual en °C.

El coeficiente 0,4 es válido para los meses de 30 y 31 días; para el mes de febrero 0,40 se sustituye por 0,37 (Remeneiras, 1974).

- Si la humedad relativa es menor a 50%, la ETP se multiplica por el factor:

¹ Se trata de la duración del día astronómico y no de la duración de la insolación diaria.

$$1 + \left(\frac{50 - HR}{70}\right) \quad (19)$$

Donde HR es la humedad relativa media del aire durante el mes considerado, en %.

4.4.3.5 Fórmula de Hargreaves

La fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) para evaluar la ETP necesita solamente datos de temperaturas y de radiación solar.

La expresión general es la siguiente:

$$ETP = 0,0023 * (tmed + 17,78) * Rs * (tmax - tmin)^{0,5} \quad (20)$$

Donde ETP es la evapotranspiración potencial diaria en mm/día, tmed es la temperatura media diaria, tmax es la temperatura máxima diaria y tmin es la temperatura mínima diaria en °C; y Rs la radiación solar incidente, convertida en mm/día.

La radiación solar incidente, Rs, se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera).

5 Metodología

Para obtener los resultados esperados, se desarrollaron distintas actividades que permitieron dar cumplimiento a los objetivos planteados. Dentro del proceso se evaluaron varias alternativas, de las cuales, en la práctica, solo fueron aplicables las que se describen en este capítulo. A manera de resumen, en la Figura 5-1 se presenta el diagrama de flujo metodológico del estudio.

La metodología muestra los métodos estadísticos empleados y presenta los procesos referentes a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) implementados.

La labor más sencilla, pero a la vez más tediosa, es la recopilación de toda la información climatológica. Aparte a esto, el modelo requiere que los datos de temperatura y evaporación estén registrados por la misma estación. Establecida la cantidad de estaciones a usar, se hace el tratamiento de los datos de todos los parámetros climáticos para después calcular la ETo.

Luego se hace el análisis estadístico, verificando la dependencia de la temperatura respecto a la altitud y, a su vez entre la evaporación y la temperatura. Después se revisa la correlación entre la ETo y la evaporación. Una vez hecho esto, se procede a elaborar los respectivos mapas.

Los mapas obtenidos serán proyectados en el sistema de coordenadas origen nacional, en concordancia con la resolución 370 de 2021 “Por medio de la cual se establece el sistema de proyección cartográfica oficial para Colombia” fija la proyección cartográfica “Transverse Mercator” como sistema oficial de coordenadas planas para Colombia, con un único origen denominado “Origen Nacional” y se encuentra codificado por el European Petroleum Survey Group como EPSG:9377.

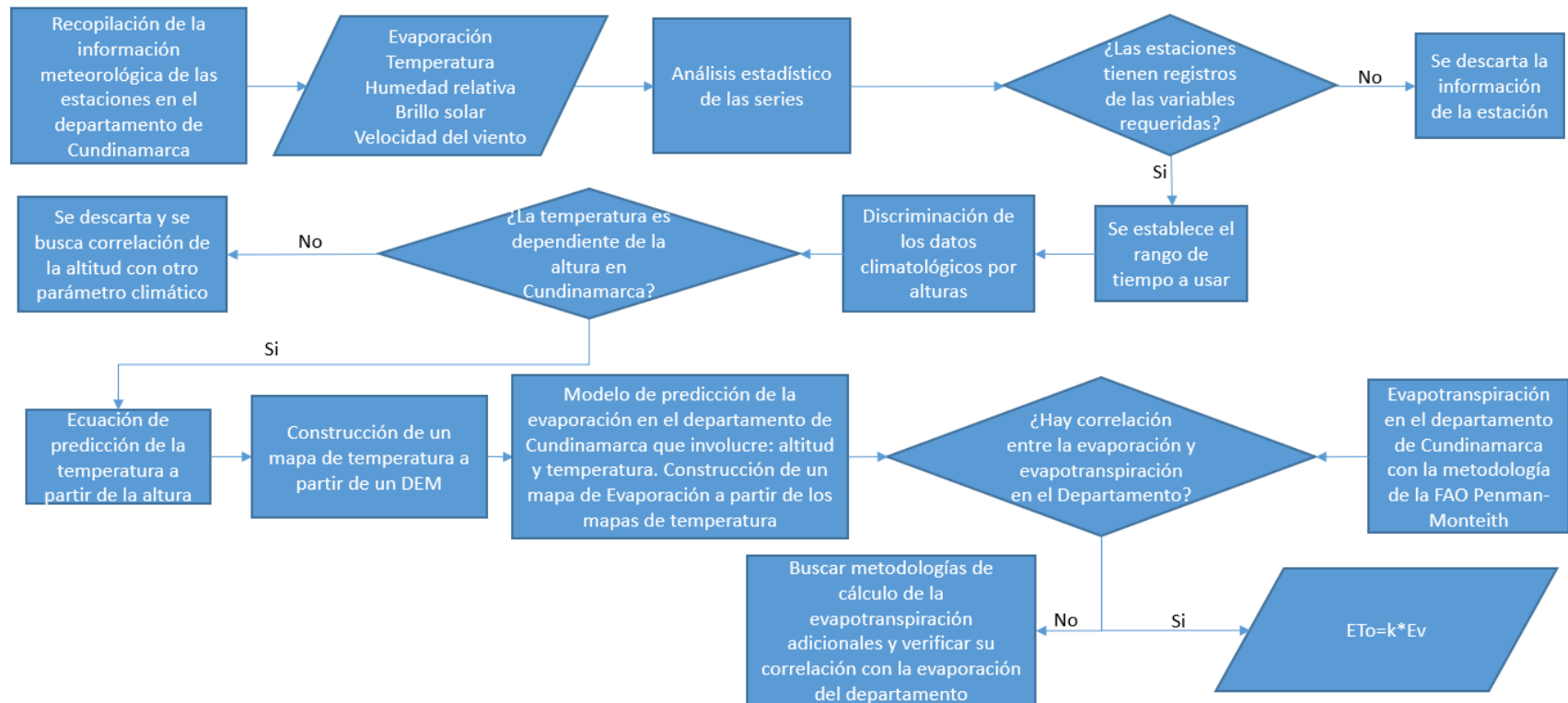


Figura 5-1 Diagrama metodológico de la regionalización de la ETo para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

5.1 Recopilación de la información climatológica

La información climatológica fue obtenida por medios digitales, a través de las entidades que operan en el departamento de Cundinamarca: el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Como ya se ha indicado, para calcular la ETo por el método de la FAO Penman-Monteith se requieren de varios parámetros climáticos (temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa mínima, humedad relativa máxima, radiación solar, brillo solar y velocidad del viento) y además de estos, para este estudio se incluye la evaporación, los cuales fueron recopilados del IDEAM y la CAR.

El IDEAM en el portal de su propiedad denominado dhime², permite la descarga del histórico de los datos climatológicos de todas las estaciones a su cargo en toda Colombia a nivel horario, diario, mensual o anual. Los registros de las estaciones ubicadas en el departamento de Cundinamarca fueron descargados a escala diaria y mensual. La información no disponible en este portal se solicitó por medio de correo electrónico a la dirección atencionalciudadano@ideam.gov.co.

A pesar de que el IDEAM tiene niveles de clasificación de los datos dependiendo de su grado de validez: preliminar, en revisión y, definitiva o validada; en este proyecto no se excluye ninguno, para tener a disposición la totalidad de los registros.

Por su lado, la CAR³ que cuenta con una red de estaciones exclusivamente en el departamento de Cundinamarca y sus alrededores, facilita la descarga de los datos climatológicos a escala mensual en su página web. La información a escala diaria se solicita por correo electrónico a la dirección sau@car.gov.co.

La red de estaciones tanto del IDEAM como de la CAR se localizan principalmente en el centro del departamento y la densidad de estas es muy reducida en el oriente y

² La dirección electrónica de dhime es <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

³ La descarga de la información mensual de la CAR se hace en la página <https://www.car.gov.co/vercontenido/2524>

noroccidente, tal como se aprecia en la Figura 5-2. El IDEAM tiene 314 estaciones y la CAR 435 en Cundinamarca.

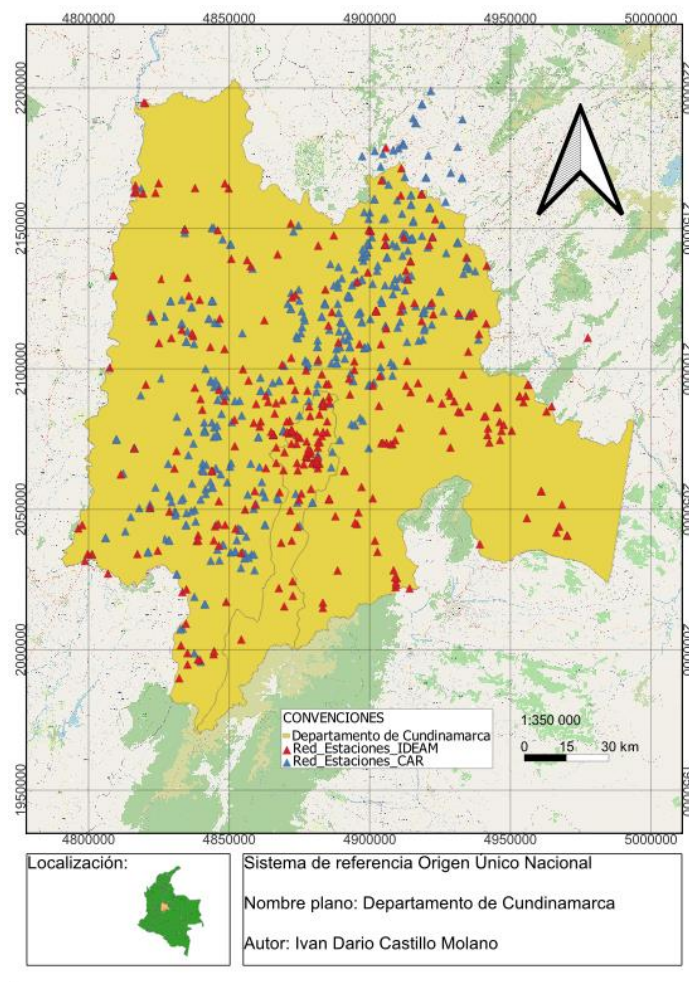


Figura 5-2 Distribución de las estaciones hidro-climatológicas en Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

Aunque en total existen 749 estaciones a lo ancho de Cundinamarca, no todas registran los parámetros climáticos de interés para este estudio, por eso, el número de estaciones empleadas se reduce significativamente. Las estaciones por cada variable climática y su análisis se indica a continuación.

5.1.1 Evaporación

Las estaciones que registran evaporación se distribuyen como se ve en la Figura 5-3. De estas, 38 pertenecen a la CAR y 22 al IDEAM para un total de 60 estaciones. Aunque es un número importante de estaciones, la densificación se sostiene ya que la mayor parte de estas se localizan en la zona central de Cundinamarca.

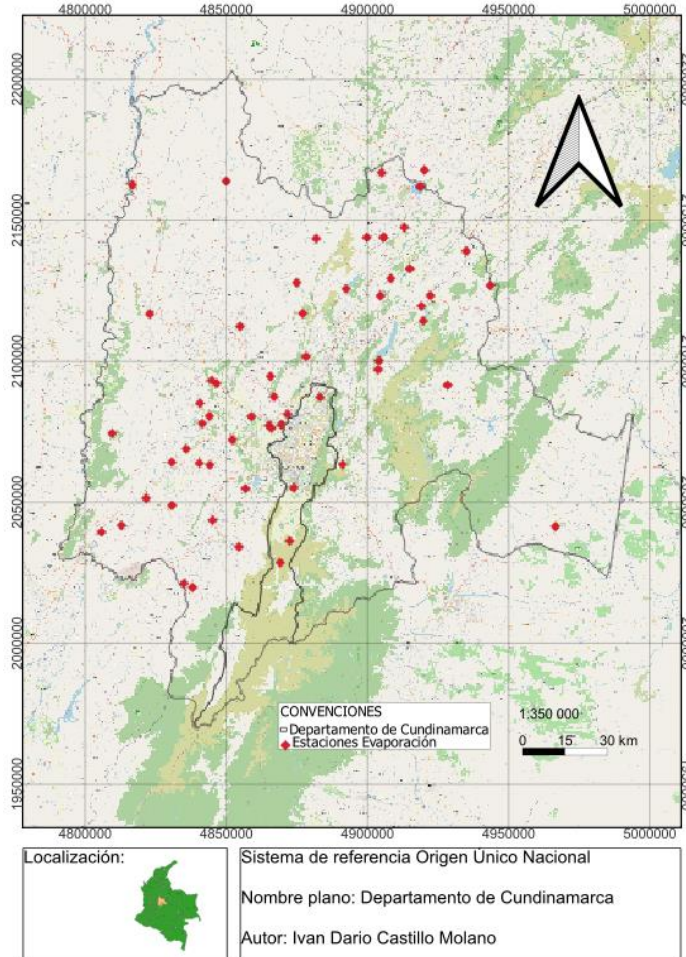


Figura 5-3 Distribución de las estaciones de evaporación en Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

En un principio, se pretendía usar una escala mensual de las series de datos, pero al hacer la comparación con los valores diarios de estas, se observó que varios de los datos totales mensuales correspondían a meses incompletos, es decir, se sumaban pese a que no tenían

registro de la totalidad de los días del mes (en algunos casos tenían 20 días o menos registrados por mes). Por esta razón, se utilizaron las series diarias de evaporación. A manera de ejemplo, se presentan las series mensuales y diarias de la estación La Mesa para el año 1999.

Tabla 5-1 Evaporación total mensual registrada en la estación La Mesa

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE
1986	37	18,6	16	10,1	41,3	61,9	83,9	101,1	92,7	51,2	68,2	78,9
1991	103,1	94,2	75,4	93,7	78,4	74,1	76,9	86,1	98,2	111,8	75,1	83,2
1992	100,7	82	104,3	69,9	75,5	106,1	77,9	98,6	109,2	99,3	62,7	89,3
1993	78,7	74,6	88,5	63,4	70,2	97,5	99	107	68,8	90	62,9	90
1994	92,8	69	62,3	44,7	56,6	92,5	91,7	101,4	90,2	70,4	50,6	85,4
1995	125,5	82,5	70,3	69,7	81,5	87,3	100,4	93,5	118,1	83,4	78,3	65,4
1996	79,2	73,6	81,2	57,1	73,3	63,4	86,3	75,5				29,7
1997	58,9	48,9	48,7	38	77,7	72,9	80,9	62,8	50,7	79,8	59,9	15,1
1998									50,6	41,7	55,8	61
1999	26,3	25	42,4	37,9	77,3	77,8	84,3	99	29,2	33,6	36,7	45,3
2000	38,5	64,1	40,7	64,7	41,3	61,9	65,7	118,7	55,1	72,2	79,6	58,1
2001	75,3	62,1	44,1	82,8	50,3	80,9	74,4	128,5	107,7	92,5	38,9	61,4
2002	119,8	88,7	73,8	53,9	89,8	77,9	92,5	110,9	98,6	107,2	65,2	77,6
2003	108,9	113,8	126,9	108,5	95		101,8	151,7	122,6	139,6	100,8	107,7
2004	130,2	112,2	138,1	104,2	112	112,7	97,3	131,5	120,3	100,9	115,9	130
2005	3	82,7	119,9	92,6	108,7	90,7	122,1	121,9	104,2	110,1	97	100,6
2006	66,2	94,7	84,1	67,2	75,2	89	117	139,4	113,1	83,8	45,7	78,8
2007	41,1	144,8	100,1	84,2	98,6	101,2	121,1	97,8	84,3	99,7	102,6	74,1
2008	91,9	107,8	93,8	94,1	77,8	88,2	108,6	89,9	107	84,4	71,1	108,8
2009	78,6	97,1	74,9	98,8	99,6	92,2	121,3	139,2	135,4	107,9	95,9	112,3
2010	139	51,5	55,5	73	85,9	77,5	82,5	102,4	99,9	78	85,7	81
2011	107,2	64,7	63,9	23,6	54,8	83,3	77	104,6	119,9	83,6	84	70,8
2012	77,4	99,2	106,6	84,6	91,6	106,1	121,5	129,6	128,7	117	84,3	113,1
2013	130	85	109	111,6	76,6	113	126,1	106,4	128,4	118,8	93,2	109,6
2014	109,9	115,6	116,2	97,2	91,3	94,3	136,1	122,6	120	127,5	97,2	88,9
2016		65,7	129	68,1	103	86,6	117,3	128,4	21,6	17,5	69,6	85,5
2017	89	114,7	98,5	95,4	88,3	90,1	89,6	101,6	109,8	112,7	66,5	96,9
2018	91,9	86,1	104	82,3	74,2	85,9	116,6	129,3	114,8	93,8	72,3	79,2

Fuente: CAR, 2023.

En la Tabla 5-1 se resaltan los valores “atípicos” para el año 1999, sin embargo, esta situación se aprecia en varios de los años registrados. Estos valores bajos se encuentran considerablemente por debajo de la media mensual multianual.

Tabla 5-2 Evaporación total diaria registrada en la estación La Mesa en el año 1999

CODIGO	AÑO	DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2120639	1999	1		0			0,4	5,8	2,6	7,7	3,4			
2120639	1999	2		1,9	2,4			3,7	2,6	4,7				
2120639	1999	3			7,1			3,4	2,9	2			5,7	
2120639	1999	4			3,6		4,1	5	3,5	7,8	3,7		1,3	
2120639	1999	5		8,8	5,9					4,6	1,8			
2120639	1999	6		1,1	4,9						0			0,9
2120639	1999	7		2,1			6,7		4,7		3,5		7,3	
2120639	1999	8								3,2			1,5	
2120639	1999	9						5,7		4,4			2,3	2,8
2120639	1999	10		6,7		3,8	1,9	1,3		6,8	3	2,4		2,1
2120639	1999	11		4,4			2,6			3,7		2,9		0,1
2120639	1999	12			4,6		3,8		7,2	2,9		4,8		
2120639	1999	13	0,9				1,3	5,7	4,8			3,7		
2120639	1999	14	4,6			3,6	4,6		3,4			3,6		6,3
2120639	1999	15				6,5	5,7		0,6					5,8
2120639	1999	16				7,4	2,8	8,8	5,3					0,7
2120639	1999	17				2,6	3,6	2,8	6		4,8	5,7		1,1
2120639	1999	18	3		5,4	3,1		0,9	2,3			2,9	8	1,9
2120639	1999	19	2,1			0,8		1,9	2,8			3,1	4,9	4,7
2120639	1999	20	1,9					2,7	7,8	5,3	3,8			
2120639	1999	21	3				1	5,7	1,8	1,9	1,4			
2120639	1999	22					5,6	1,8	0,7	6,9	3,8	3,4		
2120639	1999	23			3,3		7,7	3,9		1				
2120639	1999	24	0,5		4,6		1,9			5,4				
2120639	1999	25	0,1		0,6		3,1		3,9	4,3				5,6
2120639	1999	26					1,5		4,7	3,9			2,9	4,1
2120639	1999	27					2,5	2,3	1	6,7			2,8	3,5
2120639	1999	28				2,2	1,2	9	5,5	2,9				2,8
2120639	1999	29	2,2			3,4	6,8	5,7	5,8	5				
2120639	1999	30	4,1			4,5	1,8	1,7	1,5	6,5				
2120639	1999	31	3,9				6,7		2,9	1,4		1,1		2,9

Fuente: CAR, 2023.

Para el año 1999 en la estación La Mesa todos los meses presentan datos faltantes, como se ve en la Tabla 5-2. Por ejemplo, en el mes de enero se registraron 11 valores, lo que corresponde apenas al 35,5% del total los datos que se pueden medir para ese mes y los cuales en total suman 26,3 mm, equivalente al que se ve en la Tabla 5-1. Esto significa que los valores mensuales totalizados no fueron completados ya que constan de series diarias con registros faltantes. La situación en mención sucede también para las demás estaciones.

Posterior a esto, las longitudes de las series se contrastan entre sí para determinar un periodo en común donde existan la mayor cantidad de datos.

Con los valores totales diarios de evaporación, primero se obtendrá un promedio diario mensual anual multianual para cada mes, el cual, multiplicándolo por los días del mes arrojará la evaporación total mensual promedio a nivel multianual.

5.1.1.1 *Período de tiempo para análisis*

El listado de las estaciones que registran evaporación en el departamento de Cundinamarca se puede ver en la Tabla 5-3. Ninguna de las estaciones logra tener menos del 10% de datos faltantes.

Tabla 5-3 Estaciones registradoras de evaporación en Cundinamarca

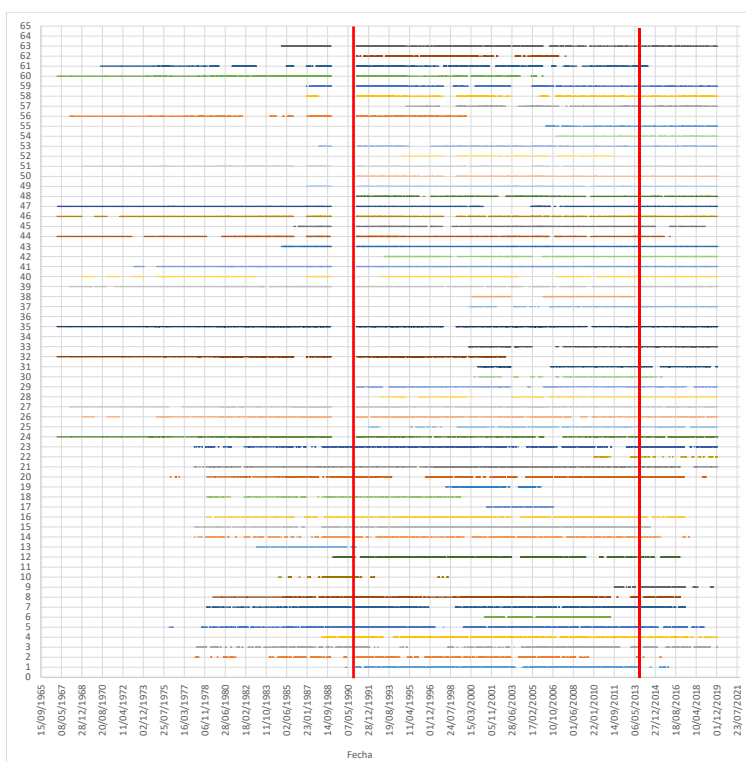
Código	Nombre	Responsable	Latitud	Longitud	Este_m	Norte_m	Altitud_m	Periodo registrado	Datos faltantes %
21206280	ACAPULCO	IDEAM	4,65	-74,33	4.852.196,00	2.072.382,97	2.650,00	15/02/1990 a 23/01/2016	49,92
23035020	AEROPUERTO PALANQUERO	IDEAM	5,47	-74,65	4.816.752,34	2.162.831,18	172,00	01/02/1978 a 29/06/2015	61,84
21205770	BASE AEREA MADRID	IDEAM	4,73	-74,27	4.858.926,34	2.080.656,53	2.550,00	16/03/1978 a 26/12/2019	58,79
35025060	LA BOLSA	IDEAM	4,58	-73,98	4.891.176,87	2.063.653,31	3.195,00	01/04/1988 a 31/12/2019	26,28
35055010	EL JAPON	IDEAM	4,38	-73,30	4.966.582,59	2.041.659,02	280,00	01/01/1976 a 28/11/2018	35,06
21206210	FLORES COLOMBIANAS	IDEAM	4,74	-74,16	4.871.697,29	2.081.456,94	2.560,00	23/04/2001 a 30/05/2011	59,98
21205670	FLORIDA LA	IDEAM	4,77	-74,44	4.840.624,55	2.085.343,63	1.915,00	01/01/1979 a 30/05/2017	28,59
35065010	GACHETA	IDEAM	4,83	-73,65	4.928.344,79	2.091.785,71	1.752,00	01/07/1979 a 30/12/2016	27,37
21205700	GUASCA	IDEAM	4,88	-73,87	4.903.783,65	2.097.280,05	2.750,00	16/09/2011 a 30/08/2019	54,09
21206160	HIDROPARAISO	IDEAM	4,57	-74,40	4.844.218,43	2.063.482,64	1.600,00	01/10/1984 a 31/05/1998	91,44
21195120	ITA VALSALICE - AUT	IDEAM	4,40	-74,40	4.845.145,38	2.043.874,81	1.460,00	05/02/1989 a 30/12/2016	36,44
24015110	LA BOYERA - AUT	IDEAM	5,30	-73,85	4.905.658,97	2.144.126,42	2.610,00	01/01/1983 a 31/12/1990	81,55
21205660	MERCEDES - AUT	IDEAM	4,58	-74,53	4.830.713,53	2.064.474,28	810,00	02/01/1978 a 29/09/2017	33,47
21195060	PANDI	IDEAM	4,19	-74,49	4.834.975,35	2.021.450,80	950,00	01/01/1978 a 31/07/2014	26,36
21195190	PASCA - AUT	IDEAM	4,31	-74,31	4.854.490,71	2.034.389,89	2.256,00	01/01/1979 a 30/04/2017	31,08
21205980	PROVIDENCIA GRANJA	IDEAM	4,79	-74,20	4.866.875,72	2.087.669,48	2.560,00	12/06/2001 a 04/11/2006	73,73
23125070	SAN CAYETANO	IDEAM	5,30	-74,07	4.881.851,32	2.143.742,70	2.200,00	01/01/1979 a 19/05/1999	57,36
21206550	SENA MOSQUERA	IDEAM	4,70	-74,22	4.865.111,60	2.077.461,91	2.543,00	01/03/1998 a 31/10/2005	77,31
21205740	SILOS	IDEAM	5,12	-73,70	4.922.288,15	2.123.542,76	2.709,00	01/02/1976 a 30/01/2019	37,12
21205420	TIBAITATA	IDEAM	4,69	-74,21	4.865.960,07	2.076.511,83	2.543,00	01/01/1978 a 31/12/2019	12,09
21205940	VILLA INES - AUT	IDEAM	4,83	-74,38	4.846.589,49	2.092.414,29	2.590,00	02/02/2010 a 16/12/2019	57,45

Código	Nombre	Responsable	Latitud	Longitud	Este_m	Norte_m	Altitud_m	Periodo registrado	Datos faltantes %
23065110	YACOPI - AUT	IDEAM	5,48	-74,35	4.850.000,38	2.164.160,20	1.347,00	01/01/1978 a 26/12/2019	33,12
2120559	APTO GUAYMARAL-USTA	CAR	4,79	-74,05	4.883.222,24	2.087.489,12	2.603,00	01/01/1967 a 31/12/2019	21,47
2120644	ARGELIA	CAR	4,36	-74,75	4.805.789,10	2.039.738,48	315,00	01/01/1992 a 30/12/2019	44,55
2401515	CARRIZAL	CAR	5,20	-73,77	4.914.971,01	2.133.078,60	2.885,00	01/01/1969 a 31/12/2019	25,09
2120540	CHECUA	CAR	5,12	-73,86	4.904.557,40	2.123.469,05	2.603,00	01/01/1968 a 31/12/2019	13,32
2120190	COL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	CAR	4,44	-74,53	4.830.792,33	2.049.088,16	594,00	01/01/1993 a 30/12/2019	25,49
2120630	DOÑA JUANA	CAR	4,50	-74,14	4.873.870,25	2.055.439,26	2.800,00	01/01/1991 a 29/12/2019	26,70
2306516	EL ACOMODO	CAR	5,02	-74,31	4.854.866,86	2.112.592,45	1.394,00	10/06/2000 a 13/07/2015	49,90
2120170	EL LLANO	CAR	5,17	-73,83	4.908.267,27	2.129.619,41	2.838,00	04/10/2000 a 26/12/2019	33,94
2120561	EL MUÑA	CAR	4,33	-74,15	4.872.439,14	2.036.558,91	2.565,00	01/01/1967 a 30/12/2002	28,95
2123502	EL PLACER	CAR	4,67	-74,72	4.809.588,78	2.074.705,28	1.335,00	01/01/2000 a 28/12/2019	23,38
2306507	INST. AGRIC. ESC VOCACIONAL PACHO	CAR	5,16	-74,13	4.874.936,93	2.128.135,62	1.940,00	01/01/1967 a 31/12/2019	17,70
2306517	GUADUAS	CAR	5,06	-74,60	4.822.887,18	2.116.980,98	1.493,00	08/02/2000 a 31/12/2019	29,54
2120060	GUARANI EL PENON	CAR	4,26	-74,18	4.869.099,07	2.028.827,95	2.800,00		
2120562	GUATAVITA	CAR	4,91	-73,87	4.904.065,01	2.100.484,29	2.679,00	01/01/1968 a 31/12/2019	17,34
2401110	ISLA DEL SANTUARIO	CAR	5,47	-73,73	4.918.677,19	2.162.254,03	2.560,00	01/01/1969 a 31/12/2019	36,36
2401511	LA BOYERA	CAR	5,30	-73,85	4.905.658,97	2.144.129,15	2.616,00	01/01/1991 a 31/12/2013	10,77
2120647	LA ESPERANZA	CAR	4,71	-74,43	4.841.425,75	2.078.178,76	1.391,00	03/04/1993 a 30/12/2019	24,69
2120632	LA FORTUNA	CAR	5,26	-73,59	4.934.931,08	2.139.343,59	2.814,00	01/01/1985 a 30/12/2019	14,50
2120548	LA IBERIA	CAR	5,04	-73,72	4.919.741,63	2.114.632,10	2.721,00	01/01/1967 a 09/03/2016	27,64
2120639	LA MESA	CAR	4,62	-74,48	4.835.699,12	2.069.189,11	1.215,00	03/01/1986 a 30/12/2018	27,24
2120557	LA PRIMAVERA	CAR	4,86	-74,21	4.865.666,46	2.094.907,38	2.623,00	01/01/1967 a 28/12/2019	25,62
2120516	LA RAMADA	CAR	4,70	-74,18	4.869.486,16	2.077.810,29	2.571,00	16/01/1967 a 23/12/2019	15,90
2120637	LAS VIOLETAS	CAR	4,38	-74,69	4.812.800,35	2.042.038,28	432,00	01/01/1991 a 31/12/2019	21,86
2120640	LA VICTORIA	CAR	4,47	-74,61	4.821.583,84	2.051.678,81	394,00	01/01/1987 a 31/12/2019	20,50
2120646	MESITAS	CAR	4,58	-74,44	4.840.423,51	2.064.116,08	1.057,00	01/01/1991 a 31/12/2019	15,53
2401519	NOVILLEROS	CAR	5,34	-73,78	4.913.066,10	2.147.637,85	2.590,00	01/01/1969 a 31/12/2019	17,66
2120652	PALOQUEMAO	CAR	4,73	-74,41	4.844.064,95	2.080.789,60	2.181,00	28/08/1994 a 22/07/2011	36,45
2120634	PARAISO PERDIDO	CAR	4,50	-74,29	4.856.813,20	2.055.117,28	2.756,00	01/01/1988 a 30/12/2019	25,09
2120691	PLANADAS	CAR	5,06	-74,11	4.877.053,03	2.117.169,51	3.357,00	01/01/2007 a 31/12/2019	14,01
2401534	REPRESA EL HATO	CAR	5,30	-73,91	4.899.744,92	2.144.122,03	2.849,00	12/03/2006 a 31/12/2019	11,85
2120541	REPRESA NEUSA	CAR	5,14	-73,97	4.892.397,00	2.125.914,35	3.028,00	01/01/1968 a 03/11/1999	28,55
2120659	REPRESA SISGA	CAR	5,08	-73,73	4.919.097,82	2.119.846,13	2.689,00	01/01/1995 a 31/12/2019	20,26

Código	Nombre	Responsable	Latitud	Longitud	Este_m	Norte_m	Altitud_m	Periodo registrado	Datos faltantes %
2401531	SAN MIGUEL DE SEMA	CAR	5,52	-73,72	4.920.196,18	2.168.040,52	2.636,00	02/01/1987 a 31/12/2019	41,87
2401513	SIMIJACA	CAR	5,51	-73,86	4.904.995,82	2.167.146,70	2.622,00	01/01/1987 a 31/12/2019	28,27
2401521	SUTATAUSA	CAR	5,15	-73,51	4.943.499,22	2.127.089,42	2.700,00	01/01/1967 a 30/12/2005	20,13
2120565	TABIO	CAR	4,92	-74,10	4.878.216,82	2.101.888,11	2.601,00	26/06/1970 a 28/05/2014	36,69
2120636	TATAMBO	CAR	4,18	-74,46	4.838.015,20	2.020.038,92	380,00	02/01/1991 a 30/10/2007	46,08
2120629	VENECIA	CAR	4,84	-74,40	4.844.866,70	2.093.431,10	2.686,00	02/01/1985 a 31/12/2019	21,16

Fuente: Autor, 2023.

El intervalo de tiempo seleccionado se determinó gráficamente buscando cubrir el periodo más extenso posible con el mayor número de las estaciones disponibles. Para ello las longitudes diarias registradas por cada una de las estaciones se agruparon, obteniendo la Gráfica 5-1.



Gráfica 5-1 Temporalidad de los registros diarios de evaporación

Fuente: Autor, 2023.

Como se muestra en la Gráfica 5-1, el periodo de tiempo de análisis para este estudio corresponde al comprendido entre 01/01/1991 hasta 31/12/2013, abarcando 23 años o 8.401 días. Este intervalo se establece para los demás parámetros climáticos empleados en este trabajo.

Tabla 5-4 Porcentaje de datos de evaporación faltantes para cada estación en el periodo de tiempo seleccionado

Estación	% Datos faltantes	Estación	% Datos faltantes
Acapulco	36,76%	El Muña	67,16%
Aeropuerto Palenquero	47,51%	El Placer	56,24%
Base Aérea Madrid	65,90%	Inst. Agric. Esc Voc Pacho	19,89%
La Bolsa	27,71%	Guaduas	62,08%
El Japón	27,97%	Guarina Peñon	63,72%
Flores colombianas	66,94%	Guatavita	16,68%
La Florida	24,91%	Isla Santuario	37,22%
Gacheta	22,82%	La Boyera	10,77%
Guasca	95,19%	La Esperanza	34,60%
Hidroparaiso	97,48%	La Fortuna	7,74%
ITA Valsalice	28,70%	La Iberia	20,74%
La Boyera	100,00%	La Mesa	21,13%
Mercedes	17,08%	La Primavera	25,59%
Pandi	13,47%	La Ramada	24,01%
Pasca	27,16%	Las Violetas	24,75%
Granja Providencia	78,30%	La Victoria	17,15%
San Cayetano	64,62%	Mesitas	18,97%
Sena Mosquera	78,30%	Novilleros	18,41%
Silos	39,57%	Paloquemao	50,27%
Tibaitata	12,21%	Paraíso Perdido	22,68%
Villa Inés	90,95%	Planadas	70,48%
Yacopi	32,81%	Represa Hato	70,19%
Apto Guaymaral	19,18%	Represa Neusa	66,91%
Argelia	52,46%	Represa Sisga	37,31%
Carrizal	21,03%	San Miguel De Sema	41,76%
Checua	10,44%	Simijaca	28,71%
Colegio Francisco José de Caldas	37,57%	Sutatausa	51,30%
Doña Juana	25,28%	Tabio	27,13%
El Acomodo	69,47%	Tatambo	60,14%
El Llano	62,53%	Venecia	17,74%

Fuente: Autor, 2023.

En la Tabla 5-4, se encuentran en rojo las estaciones con un porcentaje de datos faltantes mayor a 30% para el periodo de tiempo entre 01/01/1991 hasta 31/12/2013, donde solo 29 de estas tienen un porcentaje menor. Sin embargo, debido a que la distribución de las estaciones en el departamento de Cundinamarca no es homogénea y abarca zonas donde

hay pocas o ninguna en el oriente y occidente del departamento, se tendrán en cuenta algunas estaciones de dichos lugares con registros faltantes por encima del 30%.

Tabla 5-5 Estaciones que registran evaporación seleccionadas para el estudio

Código	Nombre	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	Este_m	Norte_m	Altitud_m	% Datos faltantes
2120516	LA RAMADA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.869.485,92	2.077.810,53	2571	24,01%
2120540	CHECUA	RÍO CHECUA	RÍO CHECUA	4.904.556,91	2.123.469,17	2603	10,44%
2120548	LA IBERIA	EMB. SISGA	EMBALSE SISGA	4.919.742,12	2.114.631,64	2721	20,74%
2120557	LA PRIMAVERA	RÍO SUBACHOQUE	RÍO SUBACHOQUE	4.865.665,97	2.094.907,51	2623	25,59%
2120559	APTO GUAYMARAL-USTA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.883.221,99	2.087.489,12	2603	19,18%
2120562	GUATAVITA	EMB. TOMINE	EMBALSE TOMINE	4.904.064,88	2.100.484,38	2679	16,68%
2120629	VENECIA	RÍO BOJACA	RÍO ANDES	4.844.866,94	2.093.430,98	2686	17,74%
2120630	DOÑA JUANA	RÍO TUNJUELO	RÍO TUNJUELO	4.873.870,13	2.055.439,35	2800	25,28%
2120639	LA MESA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.835.699,12	2.069.188,99	1215	21,13%
2120644	ARGELIA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.805.789,34	2.039.738,57	315	52,46%
2120646	MESITAS	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.840.424,01	2.064.116,48	1057	18,97%
2120647	LA ESPERANZA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.841.425,99	2.078.179,13	1391	34,60%
2123502	EL PLACER	RÍO MAGDALENA	Q. SECA	4.809.589,11	2.074.704,30	1335	56,24%
2306507	INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	RÍO NEGRO	RÍO PATASIA	4.874.936,56	2.128.135,25	1940	19,89%
2306516	EL ACOMODO	RÍO NEGRO	RÍO TABACAL	4.854.867,23	2.112.592,91	1394	69,47%
2306517	GUADUAS	RÍO NEGRO	RÍO GUADUERO	4.822.887,42	2.116.981,01	1493	62,08%
2401513	SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	4.904.996,07	2.167.146,79	2622	28,71%
2401515	CARRIZAL	LAGUNA SUESCA	LAG. SUESCA	4.914.971,51	2.133.079,09	2885	21,03%
2401519	NOVILLEROS	RÍO UBATE	RÍO UBATE	4.913.066,47	2.147.637,48	2590	18,41%
2401531	SAN MIGUEL DE SEMA	LAGUNA FUQUENE	RÍO TINJACA	4.920.194,86	2.168.041,41	2636	41,76%
2120541	REPRESA NEUSA	RÍO BOGOTA	RÍO NEUSA	4.892.396,75	2.125.914,68	3028	66,91%
2120565	TABIO	RÍO FRIO	RÍO FRIO	4.878.216,45	2.101.888,38	2601	27,13%
35055010	EL JAPON	Meta	Río Humea	4.966.582,59	2.041.659,02	280	27,97%
21195120	ITA VALSALICE - AUT	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.845.145,38	2.043.874,81	1460	28,70%
21205670	LA FLORIDA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.840.624,55	2.085.343,63	1915	24,91%
2401110	ISLA DEL SANTUARIO	Sogamoso	Río Suárez	4.918.634,40	2.162.174,27	2580	37,22%
23035020	AEROPUERTO PALANQUERO	Medio Magdalena	Directos al Magdalena entre Ríos Seco y Negro (md)	4.816.752,34	2.162.831,18	172	47,51%
23065110	YACOPI - AUT	Medio Magdalena	Río Negro	4.850.000,38	2.164.160,20	1347	32,81%
35065010	GACHETA	Meta	Río Guavio	4.928.344,79	2.091.785,71	1752	22,82%
35025060	LA BOLSA	Meta	Río Guayuriba	4.891.176,87	2.063.653,31	3195	27,71%
21205660	MERCEDES - AUT	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.830.713,53	2.064.474,28	810	17,08%
21195060	PANDI	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.834.975,35	2.021.450,80	950	13,47%
21206280	ACAPULCO	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.852.196,00	2.072.382,97	2650	36,76%
21205420	TIBAITATA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.865.960,07	2.076.511,83	2543	12,21%
21195190	PASCA - AUT	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.854.490,71	2.034.389,89	2256	27,16%

Fuente: Autor, 2023.

De las estaciones encontradas, fueron seleccionadas 35 (ver Tabla 5-5), de las cuales 11 tienen un porcentaje de datos faltantes superior a 30%. La localización de estas estaciones se ve en la Figura 5-4, la mayoría de estas se ubica en la zona central y en el oriente del departamento solo hay una.

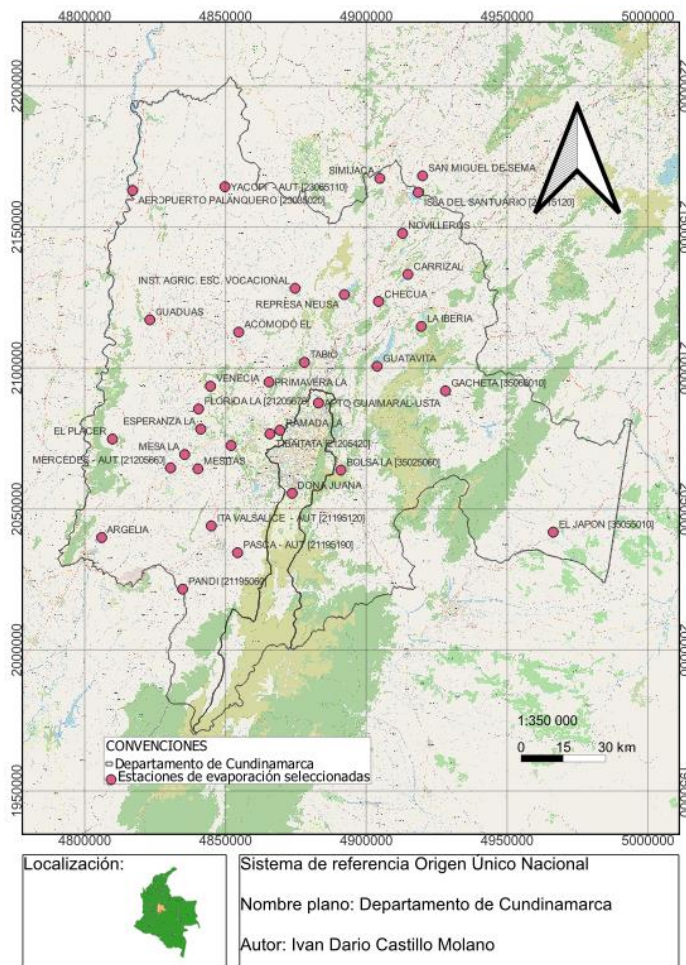


Figura 5-4 Localización de las estaciones de evaporación seleccionadas

Fuente: Autor, 2023.

5.1.2 Temperatura

En el territorio de Cundinamarca se encontraron 38 estaciones que registran temperatura, las cuales se indican en la Tabla 5-6. Esto significa, que aparte de las 35 estaciones que registran evaporación y a la vez temperatura, se incluyen 3 estaciones adicionales: Silos,

Universidad de Fusagasugá y Escuela Samper Madrid; para darle más robustez al modelo espacial que relaciona la altitud y temperatura.

Tabla 5-6 Estaciones que registran temperatura máxima seleccionadas para el departamento de Cundinamarca

Código	Nombre	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	Este_m	Norte_m	Altitud_m	% Datos faltantes
2120516	LA RAMADA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.869.485,92	2.077.810,53	2.571,00	17,03%
2120540	CHECUA	RÍO CHECUA	RÍO CHECUA	4.904.556,91	2.123.469,17	2.603,00	1,09%
2120548	LA IBERIA	EMB. SISGA	EMBALSE SISGA	4.919.742,12	2.114.631,64	2.721,00	9,78%
2120557	LA PRIMAVERA	RÍO SUBACHOQUE	RÍO SUBACHOQUE	4.865.665,97	2.094.907,51	2.623,00	3,26%
2120559	APTO GUAYMARAL	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.883.221,99	2.087.489,12	2.603,00	10,51%
2120562	GUATAVITA	EMB. TOMINE	EMBALSE TOMINE	4.904.064,88	2.100.484,38	2.679,00	10,51%
2120629	VENECIA	RÍO BOJACA	RÍO ANDES	4.844.866,94	2.093.430,98	2.686,00	7,97%
2120630	DOÑA JUANA	RÍO TUNJUELO	RÍO TUNJUELO	4.873.870,13	2.055.439,35	2.800,00	22,10%
2120639	LA MESA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.835.699,12	2.069.188,99	1.215,00	9,06%
2120641	ESC SAMPER MADRID	RÍO CALANDAIMA	RÍO CALANDAIMA	4.829.677,51	2.052.456,06	541,00	19,93%
2120644	ARGELIA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.805.789,34	2.039.738,57	315,00	14,86%
2120646	MESITAS	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.840.424,01	2.064.116,48	1.057,00	10,14%
2120647	LA ESPERANZA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.841.425,99	2.078.179,13	1.391,00	19,93%
2123502	EL PLACER	RÍO MAGDALENA	Q. SECA	4.809.589,11	2.074.704,30	1.335,00	56,52%
2306507	INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	RÍO NEGRO	RÍO PATASIA	4.874.936,56	2.128.135,25	1.940,00	6,16%
2306516	EL ACOMODO	RÍO NEGRO	RÍO TABACAL	4.854.867,23	2.112.592,91	1.394,00	52,90%
2306517	GUADUAS	RÍO NEGRO	RÍO GUADUERO	4.822.887,42	2.116.981,01	1.493,00	51,09%
2401513	SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	4.904.996,07	2.167.146,79	2.622,00	16,67%
2401515	CARRIZAL	LAGUNA SUESCA	LAG. SUESCA	4.914.971,51	2.133.079,09	2.885,00	41,30%
2401519	NOVILLEROS	RÍO UBATE	RÍO UBATE	4.913.066,47	2.147.637,48	2.590,00	10,87%
2401531	SAN MIGUEL DE SEMA	LAGUNA FUQUENE	RÍO TINJACA	4.920.194,86	2.168.041,41	2.636,00	20,65%
2401537	REPRESA DEL NEUSA	RÍO BOGOTA	RÍO NEUSA	4.892.396,75	2.125.914,68	3.028,00	62,68%
21205522	TABIO	RÍO FRIO	RÍO FRIO	4.878.216,45	2.101.888,38	2.601,00	64,49%
35055010	EL JAPON	Meta	Río Humea	4.966.582,59	2.041.659,02	280,00	1,09%
21195120	ITA VALSALICE	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.845.145,38	2.043.874,81	1.460,00	27,54%
21205670	LA FLORIDA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.840.624,55	2.085.343,63	1.915,00	16,67%
24015120	ISLA DEL SANTUARIO	Sogamoso	Río Suárez	4.918.634,40	2.162.174,27	2.580,00	9,42%
23035020	AEROPUERTO PALANQUERO	Medio Magdalena	Directos al Magdalena entre Ríos Seco y Negro (md)	4.816.752,34	2.162.831,18	172,00	32,61%
23065110	YACOPI	Medio Magdalena	Río Negro	4.850.000,38	2.164.160,20	1.347,00	15,22%
21205740	SILOS	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.922.288,15	2.123.542,76	2.709,00	15,22%
35065010	GACHETA	Meta	Río Guavio	4.928.344,79	2.091.785,71	1.752,00	5,80%
35025060	LA BOLSA	Meta	Río Guayuriba	4.891.176,87	2.063.653,31	3.195,00	23,91%
21205660	MERCEDES	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.830.713,53	2.064.474,28	810,00	12,68%
21195060	PANDI	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.834.975,35	2.021.450,80	950,00	10,87%
21206280	ACAPULCO	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.852.196,00	2.072.382,97	2.650,00	22,46%
21205420	TIBAITATA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.865.960,07	2.076.511,83	2.543,00	1,81%
21195190	PASCA	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.854.490,71	2.034.389,89	2.256,00	32,25%
2119514	UNIV. FUSAGASUGA	RIO SUBIA	RIO SUBIA	4.848.005,34	2.037.228,87	1.725,00	45,29%

Fuente: Autor, 2023.

El periodo de análisis para el proyecto fue definido a partir de las series de evaporación. También se realizó un análisis gráfico de temporalidad para evaluar que las estaciones presentarán un numero aceptable de datos (en lo posible un porcentaje de datos inferior al

50%). En este caso se tienen 5 estaciones con un porcentaje de datos faltantes mayor al 50%: El Placer, El Acomodo, Guaduas, Represa del Neusa y Tabio.

Entre tanto, para las series de temperatura mínima mensual se tienen 6 estaciones con un porcentaje de datos faltantes mayor al 50%: El Placer, El Acomodo, Guaduas, Represa del Neusa, Tabio y Aeropuerto Palanquero (ver Tabla 5-7).

Tabla 5-7 Estaciones que registran temperatura mínima seleccionadas para el departamento de Cundinamarca

Código	Nombre	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	Este_m	Norte_m	Altitud_m	% Datos faltantes
2120516	LA RAMADA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.869.485,92	2.077.810,53	2.571,00	17,03%
2120540	CHECUA	RÍO CHECUA	RÍO CHECUA	4.904.556,91	2.123.469,17	2.603,00	1,09%
2120548	LA IBERIA	EMB. SISGA	EMBALSE SISGA	4.919.742,12	2.114.631,64	2.721,00	14,49%
2120557	LA PRIMAVERA	RÍO SUBACHOQUE	RÍO SUBACHOQUE	4.865.665,97	2.094.907,51	2.623,00	3,26%
2120559	APTO GUAYMARAL	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.883.221,99	2.087.489,12	2.603,00	14,49%
2120562	GUATAVITA	EMB. TOMINE	EMBALSE TOMINE	4.904.064,88	2.100.484,38	2.679,00	9,06%
2120629	VENECIA	RÍO BOJACA	RÍO ANDES	4.844.866,94	2.093.430,98	2.686,00	6,16%
2120630	DOÑA JUANA	RÍO TUNJUELO	RÍO TUNJUELO	4.873.870,13	2.055.439,35	2.800,00	23,19%
2120639	LA MESA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.835.699,12	2.069.188,99	1.215,00	9,06%
2120641	ESC SAMPER MADRID	RÍO CALANDAIMA	RÍO CALANDAIMA	4.829.677,51	2.052.456,06	541,00	18,84%
2120644	ARGELIA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.805.789,34	2.039.738,57	315,00	15,22%
2120646	MESITAS	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.840.424,01	2.064.116,48	1.057,00	9,78%
2120647	LA ESPERANZA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.841.425,99	2.078.179,13	1.391,00	21,38%
2123502	EL PLACER	RÍO MAGDALENA	Q. SECA	4.809.589,11	2.074.704,30	1.335,00	53,26%
2306507	INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	RÍO NEGRO	RÍO PATASIA	4.874.936,56	2.128.135,25	1.940,00	6,52%
2306516	EL ACOMODO	RÍO NEGRO	RÍO TABACAL	4.854.867,23	2.112.592,91	1.394,00	53,62%
2306517	GUADUAS	RÍO NEGRO	RÍO GUADUERO	4.822.887,42	2.116.981,01	1.493,00	51,81%
2401513	SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	4.904.996,07	2.167.146,79	2.622,00	10,87%
2401515	CARRIZAL	LAGUNA SUESCA	LAG. SUESCA	4.914.971,51	2.133.079,09	2.885,00	35,14%
2401519	NOVILLEROS	RÍO UBATE	RÍO UBATE	4.913.066,47	2.147.637,48	2.590,00	3,99%
2401531	SAN MIGUEL DE SEMA	LAGUNA FUQUENE	RÍO TINJACA	4.920.194,86	2.168.041,41	2.636,00	18,12%
2401537	REPRESA NEUSA	RÍO BOGOTA	RÍO NEUSA	4.892.396,75	2.125.914,68	3.028,00	62,68%
21205522	TABIO	RÍO FRIO	RÍO FRIO	4.878.216,45	2.101.888,38	2.601,00	58,70%
35055010	EL JAPON	Meta	Río Humea	4.966.582,59	2.041.659,02	280,00	2,90%
21195120	ITA VALSALICE	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.845.145,38	2.043.874,81	1.460,00	23,55%
21205670	LA FLORIDA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.840.624,55	2.085.343,63	1.915,00	2,17%
24015120	ISLA DEL SANTUARIO	Sogamoso	Río Suárez	4.918.634,40	2.162.174,27	2.580,00	5,80%
23035020	AEROPUERTO PALANQUERO	Medio Magdalena	Directos al Magdalena entre Ríos Seco y Negro (md)	4.816.752,34	2.162.831,18	172,00	57,61%
23065110	YACOPI	Medio Magdalena	Río Negro	4.850.000,38	2.164.160,20	1.347,00	20,65%
21205740	SILOS	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.922.288,15	2.123.542,76	2.709,00	14,13%
35065010	GACHETA	Meta	Río Guavio	4.928.344,79	2.091.785,71	1.752,00	4,35%
35025060	LA BOLSA	Meta	Río Guayuriba	4.891.176,87	2.063.653,31	3.195,00	10,14%
21205660	MERCEDES	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.830.713,53	2.064.474,28	810,00	9,42%
21195060	PANDI	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.834.975,35	2.021.450,80	950,00	3,62%
21206280	ACAPULCO	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.852.196,00	2.072.382,97	2.650,00	3,62%
21205420	TIBAITATA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.865.960,07	2.076.511,83	2.543,00	1,81%
21195190	PASCA	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.854.490,71	2.034.389,89	2.256,00	17,75%
2119514	UNIV. FUSAGASUGA	RIO SUBIA	RIO SUBIA	4.848.005,34	2.037.228,87	1.725,00	44,20%

Fuente: Autor, 2023.

Las 38 estaciones que registran temperatura máxima y mínima están distribuidas de acuerdo con la Figura 5-5.

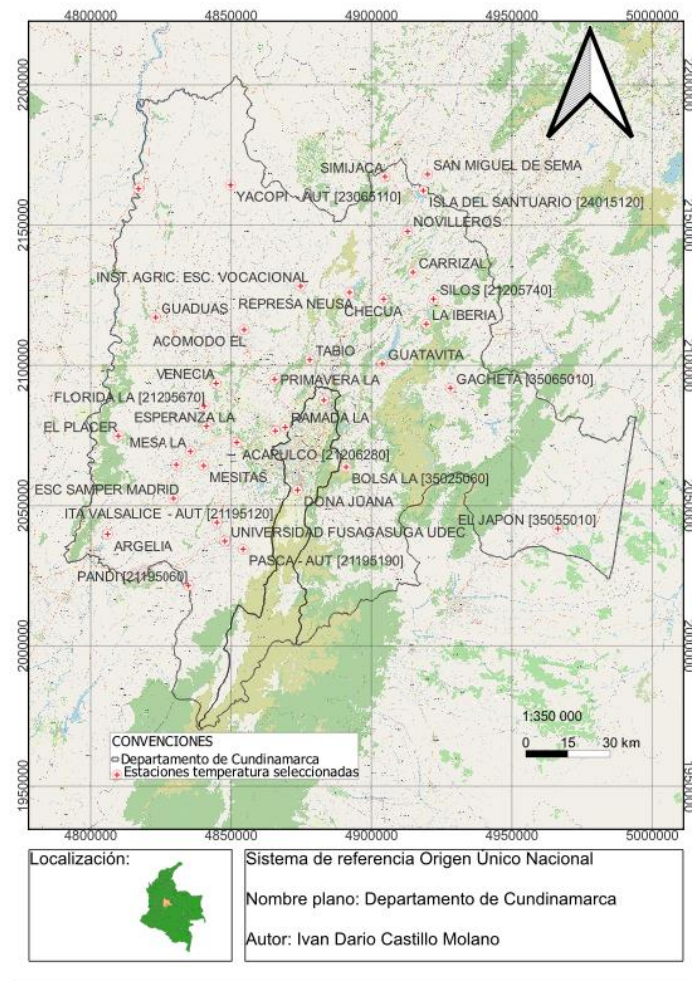


Figura 5-5 Localización de las estaciones de temperatura seleccionadas

Fuente: Autor, 2023.

5.1.3 Evapotranspiración de referencia ETO

El cálculo de la ETO a escala diaria se hizo siguiendo los lineamientos estipulados en el numeral 5.2. Para determinar la ETO se requieren los datos diarios de temperatura máxima y mínima; humedad relativa máxima, mínima o media; velocidad del viento y radiación o brillo solar. Como ya se había indicado en el capítulo 5.1.1.1, el periodo de tiempo

seleccionado para este estudio corresponde al comprendido entre 01/01/1991 hasta 31/12/2013.

En cuanto a las series de radiación solar, no fue posible recopilar información suficiente para poder usarlas, por lo que en este caso se emplearon los registros de brillo solar.

Como la ETo calculada por el método de la FAO Penman-Monteith precisa de varios parámetros climáticos, se indagaron las estaciones que registraran todos estos, teniendo en cuenta que además debían disponer de datos de evaporación. En la revisión para cada estación, se identificaron todas las variables climáticas requeridas por el método de la FAO Penman-Monteith para calcular la ETo: temperatura máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima o media, velocidad del viento y brillo solar.

La Tabla 5-8 muestra 45 estaciones con registros de evaporación, de las cuales, únicamente 18 (resaltadas en amarillo) tienen series de todas las variables climáticas para obtener la ETo.

Tabla 5-8 Parámetros climáticos que registran las estaciones con datos de evaporación en el departamento de Cundinamarca

Estación	Evaporación	Temperatura máxima	Temperatura mínima	HR máxima	HR media	HR mínima	Vel. Viento	Brillo solar
Acapulco	x	x	x	x		x		
Aeropuerto Palanquero	x	x	x	x		x		x
Apto Guaymaral	x	x	x		x		x	x
Argelia	x	x	x		x			x
Carrizal	x	x	x				x	
Checua	x	x	x		x		x	x
Col Francisco José de Caldas	x							
Doña Juana	x	x	x		x		x	x
El Acomodo	x	x	x		x			x
El Japón	x	x	x	x		x		x
El Llano	x							
El Muña	x	x	x		x		x	x
El Placer	x	x	x		x			
Gacheta	x	x	x	x		x		x
Guaduas	x	x	x		x		x	x
Guatavita	x	x	x		x		x	
INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	x	x	x		x		x	x
Isla del Santuario	x	x	x	x		x		x
ITA Valsalice	x	x	x	x		x	x	x
La Bolsa	x	x	x	x		x		x
La Boyera	x							

Estación	Evaporación	Temperatura máxima	Temperatura mínima	HR máxima	HR media	HR mínima	Vel. Viento	Brillo solar
La Esperanza	x	x	x		x		x	x
La Florida	x	x	x	x		x		
La Fortuna	x						x	x
La Iberia	x	x	x		x		x	x
La Mesa	x	x	x		x		x	x
La Primavera	x	x	x		x		x	x
La Victoria	x							
Las Violetas	x							
La Ramada	x	x	x		x			x
Mercedes	x	x	x	x		x		x
Mesitas	x	x	x		x		x	x
Novilleros	x	x	x		x		x	x
Pandi	x	x	x	x		x		x
Paraíso Perdido	x							
Pasca	x	x	x	x		x	x	x
Represa Sisga	x							
Represa Neusa		x	x		x			x
San Miguel de Sema	x	x	x		x		x	x
Silos	x	x	x	x		x		x
Simijaca	x	x	x		x		x	x
Tabio	x	x	x		x		x	x
Tibaitata	x	x	x				x	x
Venecia	x	x	x		x		x	x
Yacopi	x	x	x	x		x		x

Fuente: Autor, 2023.

En resumen, las estaciones a las que se les puede estimar la ETo se consignan en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9 Estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Código	Nombre	Responsable	Latitud	Longitud	Este_m	Norte_m	Altitud_m
21195120	ITA VALSALICE – AUT	IDEAM	4,40	-74,40	4.845.145,38	2.043.874,81	1.460,00
21195190	PASCA – AUT	IDEAM	4,31	-74,31	4.854.490,71	2.034.389,89	2.256,00
2120559	APTO GUAYMARAL-USTA	CAR	4,79	-74,05	4.883.222,24	2.087.489,12	2.603,00
2120540	CHECUA	CAR	5,12	-73,86	4.904.557,40	2.123.469,05	2.603,00
2120630	DONA JUANA	CAR	4,50	-74,14	4.873.870,25	2.055.439,26	2.800,00
2120561	EL MUNA	CAR	4,33	-74,15	4.872.439,14	2.036.558,91	2.565,00
2306507	INST. AGRIC. ESC VOCACIONAL PACHO	CAR	5,16	-74,13	4.874.936,93	2.128.135,62	1.940,00
2306517	GUADUAS	CAR	5,06	-74,60	4.822.887,18	2.116.980,98	1.493,00
2120647	LA ESPERANZA	CAR	4,71	-74,43	4.841.425,75	2.078.178,76	1.391,00
2120548	LA IBERIA	CAR	5,04	-73,72	4.919.741,63	2.114.632,10	2.721,00
2120639	LA MESA	CAR	4,62	-74,48	4.835.699,12	2.069.189,11	1.215,00
2120557	LA PRIMAVERA	CAR	4,86	-74,21	4.865.666,46	2.094.907,38	2.623,00
2120646	MESITAS	CAR	4,58	-74,44	4.840.423,51	2.064.116,08	1.057,00
2401519	NOVILLEROS	CAR	5,34	-73,78	4.913.066,10	2.147.637,85	2.590,00
2401531	SAN MIGUEL DE SEMA	CAR	5,52	-73,72	4.920.196,18	2.168.040,52	2.636,00
2401513	SIMIJACA	CAR	5,51	-73,86	4.904.995,82	2.167.146,70	2.622,00
2120565	TABIO	CAR	4,92	-74,10	4.878.216,82	2.101.888,11	2.601,00
2120629	VENECIA	CAR	4,84	-74,40	4.844.866,70	2.093.431,10	2.686,00

Fuente: Autor, 2023.

La distribución de estas estaciones a lo largo del departamento de Cundinamarca se puede ver en la Figura 5-6. Se mantiene la tendencia en cuanto a que la mayoría se ubica en la

zona central del departamento, mientras que en la zona occidental solo una y en la zona oriental ninguna.

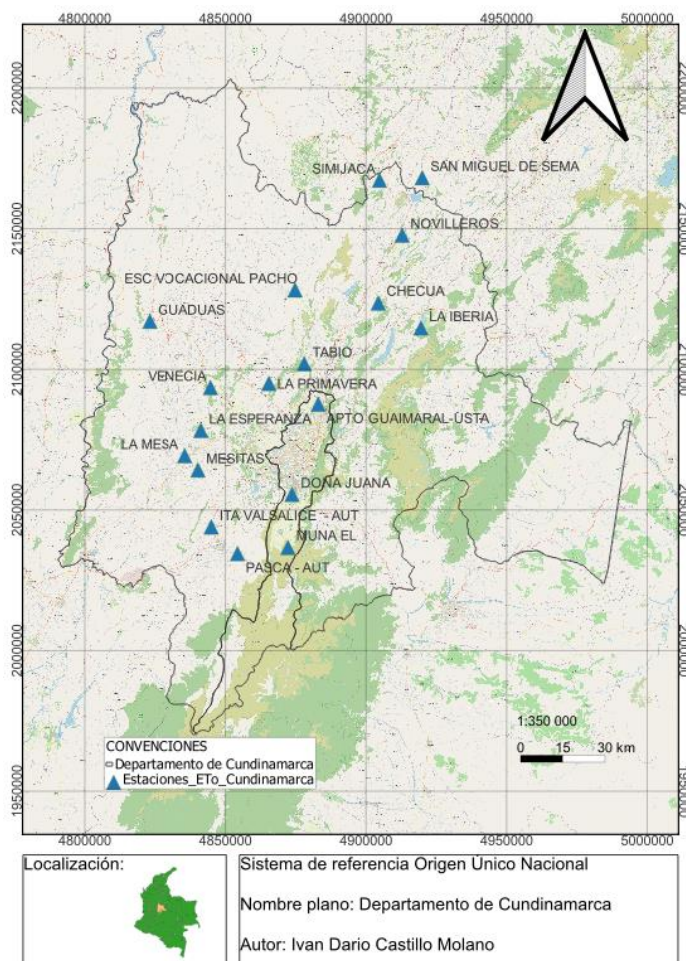


Figura 5-6 Estaciones en Cundinamarca con registros de los parámetros requeridos para calcular la ETo

Fuente: Autor, 2023.

5.1.3.1 Temperatura máxima

La estación con mayor cantidad de datos faltantes es El Muña con 66,6% seguida por Tabio con 61,5%; entre tanto la estación con menor cantidad de datos faltantes es Checua con 6,1%.

Guaduas es la estación con el dato de temperatura máxima más alto con 40°C y Venecia con el dato de temperatura máxima más bajo con 26°C. En promedio, las estaciones registran un valor máximo de temperatura de 31,8°C.

5.1.3.2 *Temperatura mínima*

La estación con mayor cantidad de datos faltantes es El Muña con 66,7% seguida por Tabio con 60,8%; entre tanto la estación con menor cantidad de datos faltantes es Checua con 6,1%.

Aeropuerto Guaymaral es la estación con el dato de temperatura mínima más bajo con -10°C y Mesitas con el dato de temperatura mínima más alto con 11,9°C. En promedio, las estaciones registran un valor mínimo de temperatura de 0,5°C.

5.1.3.3 *Humedad relativa máxima*

Las únicas estaciones con datos son Ita Valsalice y Pasca. La estación Pasca tiene el 24% de datos faltantes e Ita Valsalice tiene el 39,8% de datos faltantes. Las dos estaciones han registrado 100% de humedad relativa.

5.1.3.4 *Humedad relativa mínima*

Las únicas estaciones con datos son Ita Valsalice y Pasca. La estación Pasca tiene el 24% de datos faltantes e Ita Valsalice tiene el 39,8% de datos faltantes. La estación Pasca tiene un valor mínimo de 24% de humedad relativa e Ita Valsalice un valor mínimo de 18% de humedad relativa.

5.1.3.5 *Humedad relativa media*

La mayoría de las estaciones tiene buena cantidad de datos a excepción de Ita Valsalice y Pasca, que no presentan datos. Apartando las estaciones de Ita Valsalice y Pasca (no tienen datos), la estación con mayor cantidad de datos faltantes es Tabio con 74,6% seguida por El Muña con 66%; entre tanto la estación con menor cantidad de datos faltantes es Checua con 9,5%.

En promedio, en la estación Venecia se registra la humedad relativa más alta con 81,4% y en la estación Tabio la humedad relativa más baja con 64,8%. El valor medio entre todas las estaciones es de 74,9%.

5.1.3.6 Velocidad del viento

La mayoría de las estaciones tiene buena cantidad de datos a excepción de Guaduas, Ita Valsalice y Pasca. Las estaciones de Guaduas, Ita Valsalice y Pasca tienen un 86,3%, 88,8% y 88,5% de datos faltantes respectivamente. Entre tanto la estación con menor cantidad de datos faltantes es Mesitas con 18,6%.

La estación Doña Juana registra la velocidad del viento más alta con 11,2 m/s y la estación El Muña la velocidad del viento más baja con 0,0 m/s. El valor medio entre todas las estaciones es de 2,1 m/s.

5.1.3.7 Brillo solar

La mayoría de las estaciones tiene buena cantidad de datos a excepción de Tabio y El Muña. Las estaciones de Tabio y El Muña tienen un 72,2% y 61,2% de datos faltantes respectivamente. Entre tanto la estación con menor cantidad de datos faltantes es Checua con 4,3%.

Las estaciones Aeropuerto Guaymaral y Guaduas han registrado el brillo solar de mayor duración con 12 horas y todas las estaciones contienen valores de 0 horas. El valor medio entre todas las estaciones es de 4,6 horas.

Las gráficas de cada uno de los parámetros se encuentran en el anexo 1.

5.2 Cálculo de la ETo por el método de la FAO Penman-Monteith

La ETo puede determinarse por varios métodos (directos e indirectos), de entre los cuales, en el presente estudio, se aborda el método estándar FAO Penman Monteith (FAO 56) y el tanque evaporímetro Clase A (Allen et al., 2006).

Teniendo en cuenta que el método de la FAO Penman-Monteith para calcular la ET_o es uno de los pilares de este estudio, este capítulo presenta lo expuesto en el documento “Estudio FAO riego y drenaje 56: Evapotranspiración del cultivo”⁴.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), recomienda utilizar el método estándar FAO 56 para determinar ET_o , debido a que se ajusta tanto para zonas áridas como templadas o tropicales (Allen et al., 2006).

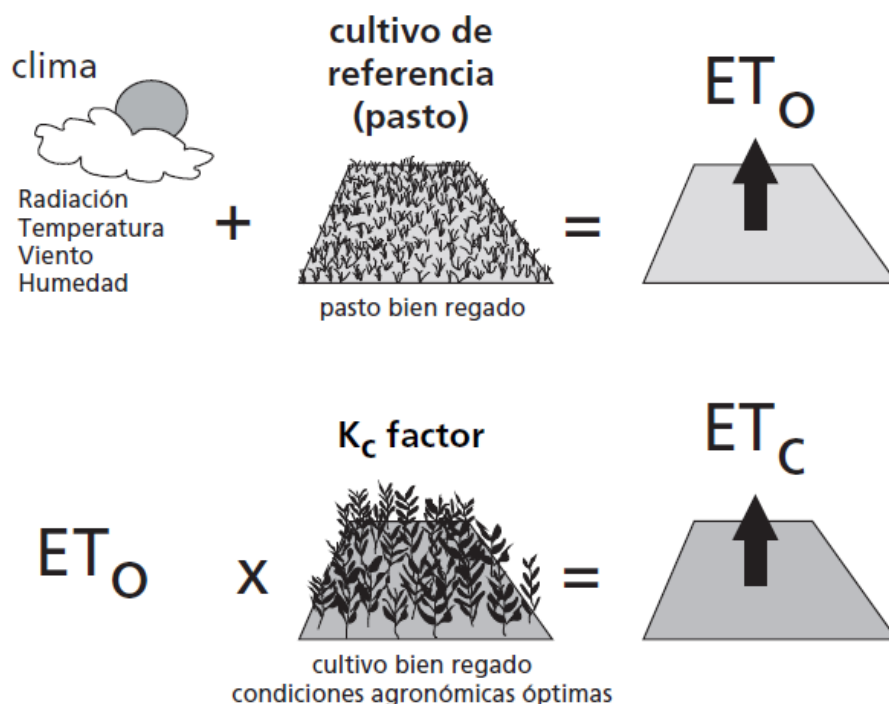


Figura 5-7 Evapotranspiración del cultivo de referencia bajo condiciones estándar

Fuente: Allen, 2006.

⁴ El método de la FAO Penman-Monteith para calcular la ET_o se encuentra detallado en el documento estudio FAO riego y drenaje 56: Evapotranspiración del cultivo, el cual fue elaborado por especialistas de la Organización para la Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas (FAO). Es por lo que la información contenida en este capítulo tendrá como referencia la parte A de dicho documento.

El método de la FAO Penman-Monteith, determina la ETo con base en tres componentes: i) resistencia aerodinámica (demanda evaporativa de la atmósfera estimada en función de las variables climatológicas: temperatura promedio, máxima y mínima, humedad relativa, horas de luz solar, viento, altitud y latitud); ii) resistencia superficial del cultivo (flujo del agua por difusión desde las raíces hasta los estomas de la planta y de la evaporación directa del agua desde el suelo) y iii) albedo (radiación solar reflejada por el cultivo) (Ortiz et al., 2018). Fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activa y adecuadamente regado. El método reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos (Allen et al., 2006).

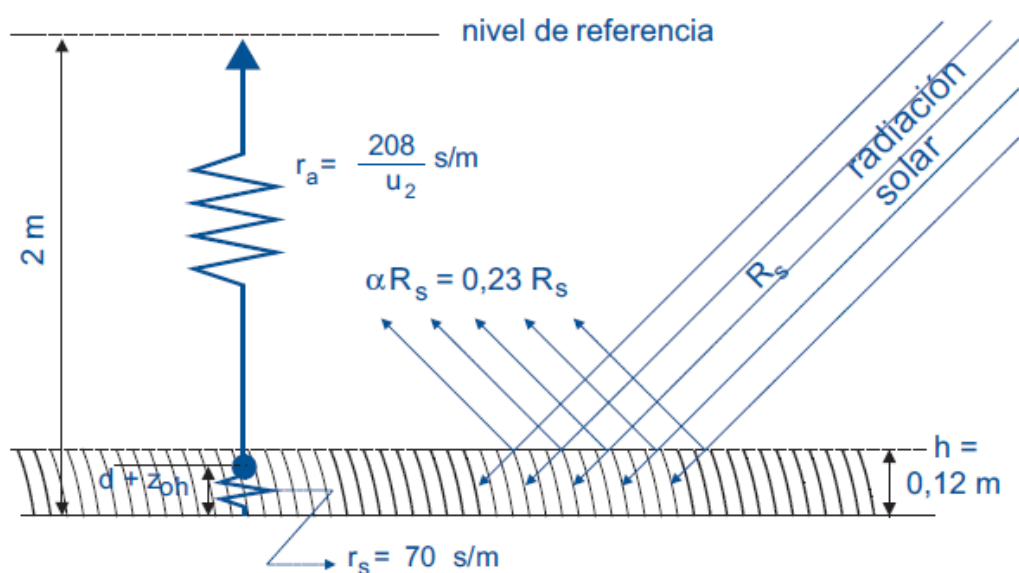


Figura 5-8 Características del cultivo hipotético de referencia

Fuente: Allen, 2006.

La ecuación descrita por el método de la FAO Penman-Monteith para obtener ETo es:

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)} \quad (21)$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia (mm*día⁻¹), Rn es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ*m⁻²*día⁻¹), Ra es la radiación extraterrestre (mm*día⁻¹), G es el flujo del calor de suelo (MJ*m⁻²*día⁻¹), T es la temperatura media del aire a 2 m de altura (°C), u₂ es la velocidad del viento a 2 m de altura (m*s⁻¹), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa), e_a es la presión real de vapor (kPa), e_s - e_a es el déficit de presión de vapor (kPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa*°C⁻¹) y γ es la constante psicrométrica (kPa*°C⁻¹). Por lo tanto, la ecuación requiere de la localización del área de estudio y, además, utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento.

Los datos de entrada necesarios para aplicar el método de la FAO Penman-Monteith son:

- La altura sobre el nivel del mar (m) de la zona para la que se determina la ETo y su latitud (grados norte o sur) son necesarios para ajustar algunos parámetros climáticos al valor medio local de la presión atmosférica y para calcular la radiación extraterrestre (Ra) y, en algunos casos, la duración máxima de la insolación (N).
- La temperatura diaria (promedio) máxima y mínima en grados Celsius (°C) son requeridas. Cuando solo se disponga de temperaturas medias diarias, el cálculo de ETo todavía es válido, pero se podría esperar una cierta subestimación debido a la relación no-lineal de la presión de vapor de saturación en relación con la temperatura (Allen et al., 2006).
- La humedad relativa máxima y mínima (%) pueden usarse en caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles.
- Generalmente, la radiación neta diaria promedio (MJ*m⁻²*día⁻¹) no está disponible, pero puede derivarse de la radiación de onda corta (promedio) o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo.
- La velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (m*s⁻¹) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo.

La metodología de cálculo de los parámetros climáticos necesarios en la ecuación de la FAO Penman-Monteith para estimar la ETo se presentan a continuación.

5.2.1 Presión atmosférica (P)

Para calcular P puede emplearse una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20°C (Allen et al., 2006):

$$P = 101,3 * \left(\frac{293 - 0,0065 * z}{293} \right)^{5,26} \quad (22)$$

Donde P es la presión atmosférica (kPa) y z la elevación sobre el nivel del mar (m).

5.2.2 Calor latente de vaporización (λ)

Expresa la energía requerida para cambiar agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. Varía en función de la temperatura, a mayor temperatura menos energía será necesaria. Como λ varía levemente dentro de rangos de temperaturas normales, se considera un valor constante de **2,45 MJ*kg⁻¹** para la simplificación de la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

5.2.3 Constante Psicrométrica (γ)

La constante psicrométrica, γ , se calcula por:

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\varepsilon * \lambda} = 0,665 * 10^{-3} \quad (23)$$

Donde γ es la constante psicrométrica (kPa*°C⁻¹), P es la presión atmosférica (kPa), λ es el calor latente de vaporización, 2,45 MJ*kg⁻¹, c_p es el calor específico a presión constante, 1,013*10⁻³ (MJ*kg⁻¹*°C⁻¹), ε es el cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622.

5.2.4 Temperatura del aire

Debido a la relación no lineal de la humedad con la temperatura, ambas incluidas en la ecuación FAO Penman-Monteith, la presión de vapor para cierto período se debe calcular como la media entre la presión de vapor bajo la temperatura máxima y la presión de vapor bajo la temperatura mínima del aire en ese periodo. La temperatura máxima diaria del aire (Tmax) y la temperatura mínima diaria del aire (Tmin) son, respectivamente, la máxima y la

mínima temperatura del aire observadas durante un período de 24 horas, desde la medianoche. La temperatura media diaria del aire (T_{media}) se emplea en la ecuación FAO Penman-Monteith solamente para calcular la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor (Δ) y del impacto de la densidad media del aire (P_a) pues el efecto de las variaciones de temperatura en el valor de estos parámetros climáticos es pequeño (Allen et al., 2006).

La T_{media} se puede expresar como el promedio entre la T_{max} y la T_{min} (la temperatura está en °C):

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (24)$$

5.2.5 Humedad del aire

De acuerdo con Allen et al. (2006), el contenido de agua del aire se puede expresar de diversas maneras. En agrometeorología, la presión de vapor, la temperatura del punto de condensación (punto de rocío) y la humedad relativa son expresiones comunes para indicar la humedad del aire.

La presión real de vapor (e_a) es la presión de vapor ejercida por el vapor de agua en el aire. Cuando el aire no se satura, la presión real de vapor será más baja que la presión de vapor de saturación. La diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor se llama déficit de presión de vapor o déficit de saturación y es un indicador preciso de la real capacidad evaporativa del aire. La temperatura del punto de rocío o punto de condensación es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarse. La presión real de vapor del aire es la presión de saturación de vapor en la temperatura del punto de rocío. La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor (e_a) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor ($e^{\circ}(T)$) a la misma temperatura (T) (Allen et al., 2006):

$$HR = \frac{e_a}{e^{\circ}(T)} * 100 \quad (25)$$

5.2.5.1 Presión media de vapor de la saturación (e_s)

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \quad (26)$$

Donde $e^{\circ}(T)$ es la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T, (kPa), T es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y $\exp [..]$ 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia. Debido a la característica no-lineal de la ecuación (26), la presión media de saturación de vapor para un día, semana, década o mes debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese período:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad (27)$$

El uso de la temperatura media del aire en lugar de las temperaturas mínima y máxima da lugar a subestimaciones de la presión media de saturación de vapor (Allen et al., 2006).

5.2.5.2 Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)

Para el cálculo de evapotranspiración, se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, Δ . La pendiente de la curva a una temperatura dada se da por:

$$\Delta = \frac{4098 * \left(0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right)\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (28)$$

Donde Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), T es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y $\exp [..]$ 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia. Para su aplicación en la ecuación FAO Penman-Monteith, la pendiente de la curva de presión de vapor (Δ) se calcula usando la temperatura media del aire (Ecuación (24)).

5.2.5.3 Presión real de vapor (e_a) derivada de los datos de humedad relativa

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min}) * \frac{HR_{max}}{100} + e^\circ(T_{max}) * \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (29)$$

Donde e_a presión real de vapor (kPa), $e^\circ(T_{min})$ es la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria (kPa), $e^\circ(T_{max})$ es la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria (kPa), HR_{max} es la humedad relativa máxima (%) y HR_{min} es la humedad relativa mínima (%).

Cuando se utiliza instrumentos con los que los errores en la estimación de HR_{min} pueden ser grandes, o cuando la exactitud de los datos es dudosa, se debe utilizar solamente HR_{max} :

$$e_a = e^\circ(T_{min}) * \frac{HR_{max}}{100} \quad (30)$$

Cuando no se cuenta con datos disponibles de HR_{min} y HR_{max} , se puede utilizar la Ecuación (31), sin embargo, esta ecuación es menos precisa que las Ecuaciones (29) o (30).

$$e_a = e^\circ(T_{media}) * \frac{HR_{media}}{100} \quad (31)$$

5.2.5.4 Déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$)

El déficit de presión de vapor es la diferencia entre la presión de saturación de vapor (e_s) y la presión real de vapor (e_a) durante un determinado período.

5.2.6 Radiación

Es la energía emitida por el sol, que se propaga a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. El sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de

radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

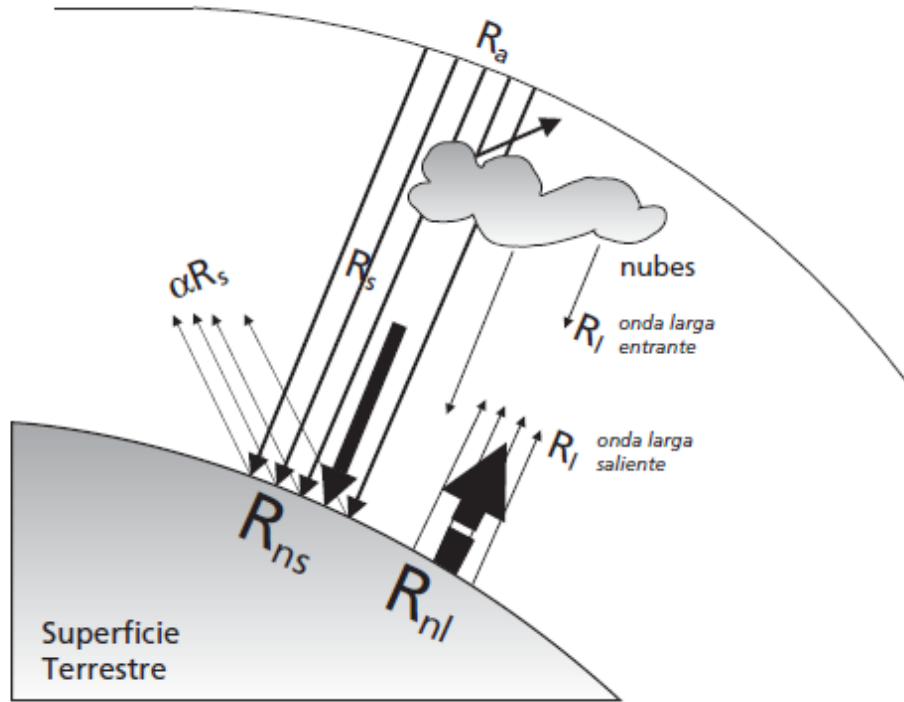


Figura 5-9 Componentes de la radiación

Fuente: Allen, 2006.

5.2.6.1 Radiación extraterrestre para periodos diarios (R_a)

La radiación extraterrestre, R_a , para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * d_r * (\omega_s * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \text{sen}(\omega)) \quad (32)$$

Donde R_a es la radiación extraterrestre ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), G_{sc} es la constante solar = $0,082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, d_r es la distancia relativa inversa Tierra-Sol, ω_s es el ángulo de radiación a la puesta del sol (radianes), φ es la latitud (radianes) y δ es la declinación solar (radianes).

La evaporación equivalente en $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$ se obtiene multiplicando Ra por 0,408. La latitud, φ , expresada en radianes es positiva para el hemisferio norte y negativa para el hemisferio sur.

La distancia relativa inversa Tierra-Sol, d_r , y la declinación solar, δ , están dadas por:

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * J\right) \quad (33)$$

Y,

$$\delta = 0,409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * J - 1,39\right) \quad (34)$$

Donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre). Los valores de J pueden estimarse para cada día (D) del mes (M) usando:

$$J = \text{Numero entero} \left(275 * \frac{M}{9} - 30 + D \right) - 2 \quad (35)$$

Si ($M < 3$) entonces $J = J + 2$. O también, si (año bisiesto y ($M < 2$)) entonces $J = J + 1$.

Para cálculos decadales, usar J para D 5, 15 y 25.

Para cálculos mensuales, J en el día 15 del mes viene dado aproximadamente por:

$$J = \text{Numero entero} (30,4 * M - 15) \quad (36)$$

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, ω_s , se da por:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) * \tan(\delta)) \quad (37)$$

5.2.6.2 Duración máxima de la insolación (N)

La duración máxima de la insolación N, está dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (38)$$

Donde ω_s es el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol calculado con la ecuación (37).

5.2.6.3 Radiación solar (R_s)

Si no se cuenta con mediciones directas de radiación solar, R_s , ésta puede ser calculada a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación (Allen et al., 2006):

$$R_s = \left(a_s + b_s * \frac{n}{N} \right) * R_a \quad (39)$$

Donde R_s es la radiación solar o de onda corta ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), n es la duración real de la insolación (horas), N es la duración máxima posible de la insolación (ecuación (38) horas), n/N es la duración relativa de la insolación, R_a es la radiación extraterrestre (ecuación (32) $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), a_s es la constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ($n = 0$) y $a_s + b_s$ es la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n = N$).

En casos en que no disponga de datos reales de radiación solar y cuando no se han realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada, se recomienda usar valores de $a_s = 0,25$ y de $b_s = 0,50$. La duración real de la insolación diaria, n , se mide con un heliógrafo. (Allen et al., 2006).

5.2.6.4 Radiación solar en un día despejado (R_{so})

La radiación en días despejados, R_{so} , cuando $n = N$, puede ser calculada de la siguiente forma:

- Para localidades cerca al nivel del mar o cuando se dispone de valores calibrados de a_s y b_s :

$$R_{so} = (a_s + b_s) * R_a \quad (40)$$

Donde R_{so} es la radiación solar en un día despejado ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$) y $a_s + b_s$ son la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n = N$).

- En casos en que los valores calibrados de a_s y b_s no estén disponibles

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) * R_a \quad (41)$$

Donde z es la elevación de la estación sobre el nivel del mar (m).

5.2.6.5 Radiación neta solar o de onda corta (Rns)

La radiación neta de onda corta resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada está dada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad (42)$$

Donde Rns es la radiación neta solar o de onda corta (MJ*m⁻²*día⁻¹), α albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia (adimensional) y Rs radiación solar o de onda corta (MJ*m⁻²*día⁻¹).

5.2.6.6 Radiación neta de onda larga (Rnl)

La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann. Se debe tener en cuenta que el flujo de energía neta que sale de la superficie terrestre es menor que la calculada y dada por la ley de Stefan-Boltzmann debido a la absorción y radiación devuelta del cielo (Allen et al., 2006).

$$R_{nl} = \sigma * \left(\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * (1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (43)$$

Donde Rnl es la radiación neta de onda larga (MJ*m⁻²*día⁻¹), σ es la constante de Stefan-Boltzmann (4,903*10⁻⁹*MJ*K⁻⁴*m⁻²*día⁻¹), T_{max,K} es la temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas (K = °C + 273,16), T_{min,K} es la temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas (K = °C + 273,16), e_a es la presión de vapor real (kPa), Rs/Rso es la radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1,0), Rs es la radiación solar medida o calculada (MJ*m⁻²*día⁻¹) y Rso es la radiación en un día despejado (MJ*m⁻²*día⁻¹).

5.2.6.7 Radiación neta (Rn)

La radiación neta (Rn) es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (Rns) y la radiación neta de onda larga (Rnl):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (44)$$

5.2.6.8 Flujo de calor del suelo (G)

Como el flujo del calor del suelo es pequeño comparado a la R_n , particularmente cuando la superficie está cubierta con vegetación y los periodos de tiempo de cálculo son de 24 horas o más, un procedimiento simple del cálculo se presenta aquí para periodos largos de tiempo, basados en la idea de que la temperatura del suelo tiene similar tendencia a la de la temperatura del aire (Allen et al., 2006):

$$G = c_s * \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} * \Delta z \quad (45)$$

Donde G es el flujo de calor del suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), c_s la capacidad calorífica del suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$), T_i la temperatura del aire en el tiempo i ($^{\circ}\text{C}$), T_{i-1} la temperatura del aire en el tiempo $i-1$ ($^{\circ}\text{C}$), Δt el intervalo de tiempo considerado (días) y Δz la profundidad efectiva del suelo (m).

Como la variación de la temperatura del suelo se retrasa con relación a los cambios de la temperatura del aire, la temperatura media por un período más largo al estudiado debe ser considerado para determinar el flujo diario del calor del suelo, es decir, Δt debe exceder un día (Allen et al., 2006).

- Para periodos diarios y decadarios:

Como la magnitud del flujo de calor bajo la superficie de referencia es relativamente pequeña, esta puede ser ignorada y entonces:

$$G_{\text{día}} \approx 0 \quad (46)$$

- Para períodos mensuales:

Si se asume una capacidad calorífica constante del suelo de $2,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$ y una profundidad media de suelo, la ecuación (45) se puede utilizar para derivar G para períodos mensuales:

$$G_{\text{mes},i} = 0,07 * (T_{\text{mes},i+1} - T_{\text{mes},i-1}) \quad (47)$$

o, si no se conoce el valor de $T_{\text{mes}, i+1}$

$$G_{\text{mes},i} = 0,14 * (T_{\text{mes},i} - T_{\text{mes},i-1}) \quad (48)$$

Donde $T_{mes, i}$ es la temperatura media del aire en el mes i ($^{\circ}\text{C}$), $T_{mes, i-1}$ es la temperatura media del aire en el mes $i-1$ ($^{\circ}\text{C}$) y $T_{mes, i+1}$ es la temperatura media del aire en el mes $i+1$ ($^{\circ}\text{C}$).

5.2.7 Velocidad del viento

El viento se caracteriza por su dirección y su velocidad. La dirección del viento se refiere a la dirección de la cual el viento está soplando. Para el cómputo de la evapotranspiración, la velocidad del viento es una variable importante. Como la velocidad del viento en una localidad dada varía con el tiempo, es necesario expresarla como el promedio sobre un intervalo determinado de tiempo (Allen et al., 2006).

La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con altura. Por esta razón los anemómetros se colocan en una altura estándar elegida, 10 m en meteorología y 2 o 3 m en agrometeorología. Para el cálculo de la evapotranspiración, se requiere la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie. Para ajustar los datos de velocidad del viento obtenidos de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2m, se puede usar una relación logarítmica:

$$u_2 = u_z * \frac{4,87}{\ln(67,8 * z - 5,42)} \quad (49)$$

Donde u_2 es la velocidad del viento a 2 m sobre la superficie ($\text{m} * \text{s}^{-1}$), u_z es la velocidad del viento medida a z m sobre la superficie ($\text{m} * \text{s}^{-1}$) y z es la altura de medición sobre la superficie (m).

5.2.8 Cálculo de datos climáticos faltantes

El cálculo requiere de datos diarios, decadarios o mensuales de la temperatura máxima y mínima del aire (T_{max} y T_{min}), la presión real de vapor (e_a), la radiación neta (R_n) y la velocidad del viento medida a 2 m (u_2). Cuando no se tenga registro de alguno de estos parámetros, se recomienda usar lo que se presenta a continuación.

5.2.8.1 Datos faltantes de humedad

Se puede llevar adelante una estimación de la presión real de vapor, e_a , si se asume que la temperatura del punto de rocío (Trocío) es similar a la temperatura mínima diaria (Tmin). Se asume implícitamente que, a la salida del sol, cuando la temperatura del aire está alrededor de Tmin, el aire está casi saturado con vapor de agua y que la humedad relativa es de alrededor de 100%. Si Tmin se utiliza para representar Trocío entonces (Allen et al., 2006):

$$e_a = e^{\circ}(Tmin) = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * Tmin}{Tmin + 237,3}\right) \quad (50)$$

La relación Trocío \approx Tmin se mantiene para localidades en que el cultivo que cubre el suelo de la estación está bien regado.

5.2.8.2 Datos de radiación

Existen pocos instrumentos de medición de la radiación neta instalados en estaciones agrometeorológicas. A falta de mediciones directas, la radiación de onda larga y la radiación neta pueden ser derivadas de otros parámetros meteorológicos como: horas de insolación, temperatura del aire y presión de vapor (Allen et al., 2006).

5.2.8.2.1 Datos de una estación cercana

Este método se basa en el hecho de que para el mismo mes y a menudo para el mismo día, las variables que afectan la radiación solar entrante, R_s , y la duración de la insolación, n , son similares a lo largo de una región dada. Se debe considerar que: (i) el tamaño de la región considerada sea pequeño; (ii) los mecanismos atmosféricos que gobiernan la precipitación y la nubosidad son casi idénticos dentro de las partes analizadas de la región; y (iii) la fisiografía de la región es casi homogénea. Las diferencias en el relieve deben ser mínimas. Si se cumplen tales condiciones, los datos de radiación observados en estaciones cercanas pueden ser utilizados (Allen et al., 2006).

En casos en que la distancia norte-sur a una estación meteorológica dentro de la misma región homogénea excede 50 kilómetros, el valor de R_a cambiará y por ello los valores de R_s se deben ajustar usando el cociente de la radiación solar y la radiación extraterrestre, R_s/R_a :

$$R_s = \frac{R_{s,reg}}{R_{a,reg}} R_a \quad (51)$$

Donde $R_{s,reg}$ es la radiación solar en la localidad situada en la región ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$), $R_{a,reg}$ radiación extraterrestre en la localidad situada en la región ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$).

El método de estimación de la Ecuación (51) se recomienda para cálculos mensuales de ETo. Si se usa este método para estimaciones diarias de ETo, se tiene que realizar un análisis más cuidadoso de los datos climáticos de las estaciones meteorológicas de las que se importa y exporta la información para verificar si ambas estaciones están en la misma región climática homogénea y si están lo bastante cercanas para tener las condiciones similares en el mismo día (Allen et al., 2006).

5.2.8.2.2 Radiación solar derivada de diferencias térmicas

La diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire se relaciona con el grado de nubosidad en una localidad. Este principio ha sido utilizado por Hargreaves y Samani para desarrollar estimaciones de ETo usando solamente datos de temperatura del aire. La ecuación de radiación de Hargreaves, ajustada y validada en varias estaciones meteorológicas en una amplia variedad de condiciones climáticas, está dada por (Allen et al., 2006):

$$R_s = k_{R_s} * \sqrt{(T_{max} - T_{min})} * R_a \quad (52)$$

Donde R_a es la radiación extraterrestre ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$), T_{max} es la temperatura máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} es la temperatura mínima del aire ($^{\circ}\text{C}$), k_{R_s} es el coeficiente de ajuste (0,16, 0,19) ($^{\circ}\text{C}^{-0,5}$).

Para zonas del interior se usa $k_{R_s} = 0,16$ y para zonas costeras $k_{R_s} = 0,19$.

La fracción de radiación extraterrestre que llega a la superficie terrestre, R_s/R_a , varía en un rango de 0,25 en un día cubierto a cerca de 0,75 en un día despejado y con el cielo claro. El valor de R_s dado por la ecuación (52) debe ser $\leq R_{so}$. Para las condiciones de islas, la metodología no es apropiada debido a los efectos de amortiguación de las variaciones térmicas del cuerpo circundante del agua (Allen et al., 2006).

5.3 Estadística de los datos

Abordando el análisis estadístico de las series de tiempo de los parámetros climáticos, dentro del desarrollo del estudio se requiere:

- Determinar para cada parámetro climático las estaciones cuyas series son homogéneas o no.
- Identificar los valores atípicos con la prueba de Grubbs.
- Se considero conveniente, no completar los datos faltantes, ya que para ninguna de las estaciones se obtuvo la totalidad de las series. Además, se comprobó que, con diversas metodologías de llenado, se alteraban los resultados esperados.
- Determinar los valores medios mensuales multianuales para la temperatura y evaporación. También los valores medios anuales multianuales.
- Evaluar los modelos de regresión que mejor describan las relaciones entre la altitud, temperatura y evaporación.

5.3.1 Homogeneidad de las series de datos

La homogeneidad de una serie de datos indica la uniformidad del comportamiento de una variable climática a lo largo del tiempo, esto significa que los valores medidos no tienen diferencias abruptas comparados con los valores inmediatamente antes o después en el tiempo. En general, dependiendo de la época del año se esperan valores similares a través de los años ya sea en invierno o en verano, claro está, que debido al cambio climático y a la influencia de los fenómenos del niño y niña, dichos valores irán alcanzando niveles muy superiores a los registros históricos.

Andrades et al (2019) indica existen distintos factores que promueven la no homogeneidad de una serie: a) Mal estado o defectos de los instrumentos de medición; b) Cambio de observador meteorológico, que puede afectar las estimaciones en que intervienen elementos subjetivos; c) Cambio del tipo de instrumental y/o de sus condiciones de instalación; d) Cambio de los métodos de depuración de datos; e) Modificaciones eventuales del ambiente, estos cambios pueden ser: naturales (desarrollo de la vegetación) o artificiales (ligados a las actividades humanas) y e) Cambios climáticos o microclimáticos.

Ocampo (2019) menciona que las pruebas de homogeneidad que se utilizan comúnmente son las de Wilcoxon, Mann-Whitney y Von Neuman. Sin embargo, en algunas investigaciones como en las hechas por Kang y Yusof (2012) se utiliza otra aproximación para la evaluación de la homogeneidad de una serie llamada detección del punto de cambio. Este tipo de prueba evalúa si en algún periodo se da algún cambio en las propiedades estadísticas, y, por consiguiente, si se llega a presentar ese cambio se concluiría que la serie es heterogénea y por lo tanto se estaría violando el supuesto de estacionalidad. Dentro de este tipo de pruebas se encuentra la prueba de Pettitt, la prueba del rango de Buishand (BR)⁵ y la prueba de homogeneidad normal estándar (SNHT)⁶ (Kang & Yusof, 2012).

Existen algunas diferencias entre la prueba SNHT, BR y la prueba de Pettitt. SNHT es sensible a la hora de detectar los cambios abruptos próximos al inicio y final de la serie. En la prueba BR y la prueba de Pettitt es más fácil identificar los cambios en la mitad de la serie. Además, las pruebas SNHT y BR asumen que Y_i (observaciones o datos) tiene una distribución normal, mientras que la prueba de Pettitt no necesita esta suposición porque es una prueba de rango no paramétrica (Kang & Yusof, 2012).

En este estudio se utilizará la prueba de Pettitt, la cual se ejecutará en Microsoft Excel con el programa XLSTAT⁷, el cual la incluye en su módulo de “prueba de homogeneidad”.

5.3.1.1 Prueba de Pettitt

Esta prueba se basa en el orden de rango r_i de los valores Y_i e ignora la normalidad de la serie. El estadístico que se emplea se define como:

$$X_y = 2 \sum_{i=1}^y r_i - y(n+1), \quad y = 1, 2, \dots, n \quad (53)$$

El punto de cambio de la serie está localizado en k y, este estadístico de prueba es comparado con el valor crítico de Pettitt (1979).

⁵ Por sus siglas en inglés Buishand range test.

⁶ Por sus siglas en inglés Standard normal homogeneity test.

⁷ XLSTAT es una herramienta estadística que funciona como complemento de Microsoft® Excel® y no es de uso libre. En este estudio se usa la licencia de estudiante premium.

$$X_k = \max_{1 \leq y \leq n} |X_y| \quad (54)$$

El juego de hipótesis planteado en la prueba es el siguiente:

H₀: los datos son homogéneos.

H_a: hay una fecha en la que hay un cambio en los datos.

El nivel de significancia propuesto es $\alpha = 0,01$, es decir, la probabilidad de rechazar la *H₀* cuando es verdadera es de 1%.

5.3.2 Valores atípicos o extremos

En relación con los otros datos, un valor es atípico o extremo cuando está muy alejado del patrón general de la mayoría de los datos. Cuando se explora un conjunto de datos, se deben considerar los valores extremos, ya que pueden revelar información importante y afectar en gran medida el valor de la media y de la desviación estándar, así como distorsionar gravemente un histograma (Triola, 2009).

Existen varios procedimientos para determinar los datos atípicos que pueden ser gráficos o estadísticos. En este apartado se mencionan los empleados para este proyecto.

5.3.2.1 Puntuación Z (Z score)

Una puntuación *z* (o valor estandarizado) es el número de desviaciones estándar que un valor *x* se encuentra por arriba o por debajo de la media. Se calcula utilizando la siguiente expresión (Triola, 2009):

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (55)$$

Donde *z* es el valor estandarizado, *x* corresponde al dato de la serie, μ es la media y σ la desviación estándar.

Las puntuaciones *z* son medidas de posición, en el sentido de que describen la localización de un valor (en términos de desviaciones estándar) en relación con la media. Una puntuación *z* de 2 indica que un valor está a dos desviaciones estándar *por arriba* de la

media, en tanto que una puntuación z de -3 indica que un valor está a tres desviaciones estándar *por debajo* de la media ((Triola, 2009).

Para determinar que un valor es infrecuente en este estudio, se identifican los que están a más de 2,5 desviaciones estándar de la media. De igual forma, los valores infrecuentes son los que tienen puntuaciones z menores que $-2,5$.

5.3.2.2 Prueba de Grubbs

Denominada así por Frank E. Grubbs, quien la publicó en 1950. Se conoce también como prueba residual máxima normalizada o prueba de desviación extrema studentizada. Se utiliza para detectar valores atípicos en un conjunto de datos univariados que se supone que proviene de una población distribuida normalmente (López-Torrijos, 2021).

La prueba de Grubbs detecta un valor atípico a la vez. Este valor atípico se elimina del conjunto de datos y la prueba se repite hasta que no se detectan valores atípicos adicionales. Sin embargo, las probabilidades de detección cambian en cada iteración. La prueba no debe usarse para tamaños de muestra de seis datos o menos, ya que con frecuencia etiqueta la mayoría de los puntos como valores atípicos (López-Torrijos, 2021).

La hipótesis nula H_0 es que no hay datos atípicos. Y la estadística de prueba es:

$$G = \frac{\max_{1,2,\dots,n} |y_i - \bar{y}|}{\sigma} \quad (56)$$

Siendo \bar{y} la media y σ la desviación estándar.

Mide la máxima desviación y la divide entre la desviación estándar. El resultado lo compara con respecto a un valor de referencia sacado a partir de la distribución t de student. De ahí el origen de su nombre alternativo (López-Torrijos, 2021).

La hipótesis se rechaza si

$$G > \frac{n-1}{n} \sqrt{\frac{t_{\alpha/2n,n-2}^2}{n-2 + t_{\alpha/2n,n-2}^2}} \quad (57)$$

Donde $t_{\alpha/2n,n-2}^2$ denota el valor crítico después del cual se debe considerar un valor extremo.

5.3.3 Modelos de regresión

El concepto de análisis de regresión se refiere a encontrar la mejor relación entre Y (variable dependiente o respuesta) y x (variable independiente o regresor) cuantificando la fuerza de esa relación, y empleando métodos que permitan predecir los valores de la respuesta dados los valores del regresor x. En muchas aplicaciones habrá más de un regresor, es decir, más de una variable independiente que ayude a explicar a Y. El análisis resultante se denomina regresión múltiple; en tanto que el análisis del caso con un solo regresor recibe el nombre de regresión simple (Walpole et al., 2012).

A continuación, se explicarán las regresiones simples que mejor se ajustaron a los conjuntos de datos del estudio.

5.3.3.1 Regresión lineal simple

La forma más habitual de emparejar dos variables es la lineal, en donde, la variable de respuesta Y es explicada por la variable independiente x linealmente.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * x \quad (58)$$

en la que, por supuesto, β_0 es la intersección y β_1 es la pendiente (Walpole et al., 2012).

Walpole et al (2012) deduce que, si la relación es exacta y no contiene ningún componente aleatorio o probabilístico, entonces se trata de una relación determinista entre dos variables científicas. Pero, la mayoría de las veces, son de naturaleza probabilística toda vez que la relación no puede considerarse exacta, es decir, una x dada no siempre produce el mismo valor de Y.

5.3.3.2 Regresión polinomial simple

La regresión polinomial simple es un caso derivado de la regresión lineal múltiple donde $k=1$.

$$\mu_{Y|x} = \beta_0 + \beta_1 * x_k + \beta_2 * x_k^2 + \dots + \beta_r * x_k^r + \epsilon_i \quad (59)$$

Si se desea ajustar a los n pares de observaciones $\{(x_i, y_i); i=1, 2, \dots, n\}$, cada observación y_i , satisface la ecuación (Walpole et al., 2012):

$$y_i = \hat{y}_i + e_i = b_0 + b_1 * x_k + b_2 * x_k^2 + \dots + b_r * x_k^r + e_i \quad (60)$$

Donde r es el grado del polinomio y ϵ_i y e_i son el error aleatorio y el residual asociados con la respuesta y_i y con el valor ajustado \hat{y}_i , respectivamente. Aquí el número de pares, n, debe ser al menos r+1, que es el número de parámetros a estimar (Walpole et al., 2012).

5.3.3.3 Regresión de decaimiento exponencial

Las funciones exponenciales pueden usarse para modelar series que se reducen. Tales sistemas exhiben un decrecimiento exponencial en vez de un crecimiento exponencial. El modelo es casi el mismo, excepto que hay un signo negativo en el exponente. Así, para alguna constante positiva k, se tiene (Strang & Herman, 2022):

$$y = y_0 * e^{-kt} \quad (61)$$

Existe una ecuación diferencial asociada al decrecimiento exponencial. Tenemos

$$y' = -k * y_0 * e^{-kt} = -ky \quad (62)$$

Los sistemas que presentan un decrecimiento exponencial se comportan según el modelo $y = y_0 * e^{-kt}$ donde y_0 representa el estado inicial del sistema y $k > 0$ es una constante, llamada constante de decrecimiento.

5.3.3.4 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación lineal r mide la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos apareados x y y en una muestra. Su valor se calcula con la fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (63)$$

Donde r es el coeficiente de correlación y n es el número de datos de la muestra.

El coeficiente de correlación lineal también se conoce como coeficiente de correlación producto momento de Pearson, en honor de Karl Pearson (1857-1936), quien lo desarrolló originalmente (Triola, 2009).

Triola (2009) asevera el valor de r siempre debe estar entre -1 y 1. Si r se acerca a 0, se concluye que no existe una correlación lineal entre x y y , pero si r se acerca -1 o 1, se interpreta que hay una correlación lineal entre x y y .

5.3.3.5 Raíz del error cuadrático medio RMSE

Para entender la RMSE⁸ se debe abordar primero el error cuadrático medio (MSE). El MSE se expresa como:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (64)$$

Donde n es el número de datos, y_i es el dato real y \hat{y}_i es la predicción del modelo. MSE mide el error cuadrático promedio de las predicciones respecto a los valores observados o reales.

Entre tanto, el RMSE se puede interpretar como los errores de predicción o la desviación estándar de los valores residuales, donde, RMSE indica el nivel de dispersión de estos valores residuales. La raíz cuadrada garantiza que la magnitud de los errores sea equiparable con la magnitud de los valores objetivo. En otras palabras, muestra la concentración de los datos respecto a la línea de mejor ajuste.

La RMSE se define por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (65)$$

Un valor pequeño de RMSE infiere que el modelo se ajusta a la serie, mientras que un valor alto indica que los valores predichos se alejan de los observados por lo que no sería recomendable usar el modelo de regresión en dicha muestra.

⁸ Por sus siglas en inglés Root Mean Squared Error.

5.4 Construcción de los mapas

La información de la altitud se descarga del portal Earth Data⁹ de la NASA del cual es posible obtener imágenes de diversas plataformas como ASF¹⁰. De allí se toma el modelo digital de terreno (MDT) para el departamento de Cundinamarca en formato ráster cuya extensión es .tif, con una resolución de 12,5mx12,5m de píxel (ver Figura 5-10).

Igualmente, se utilizaron los datos mensuales multianuales históricos de temperatura, evaporación; y los coeficientes de relación para obtener la ETo.

Como ya se mencionó, con los datos mensuales se estudió el comportamiento de la temperatura con respecto a la altura y posteriormente de la evaporación con respecto a la temperatura; estableciendo los modelos de regresión para cada mes y anual. Para el mapa de la ETo, se contrastaron las series de ETo con las de evaporación lo que arrojó unos coeficientes de relación, que fueron transformados en ráster los cuales, al multiplicarlos por los ráster de evaporación se obtuvieron los mapas de ETo.

⁹ Sitio web: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

¹⁰ Alaska Satellite Facility

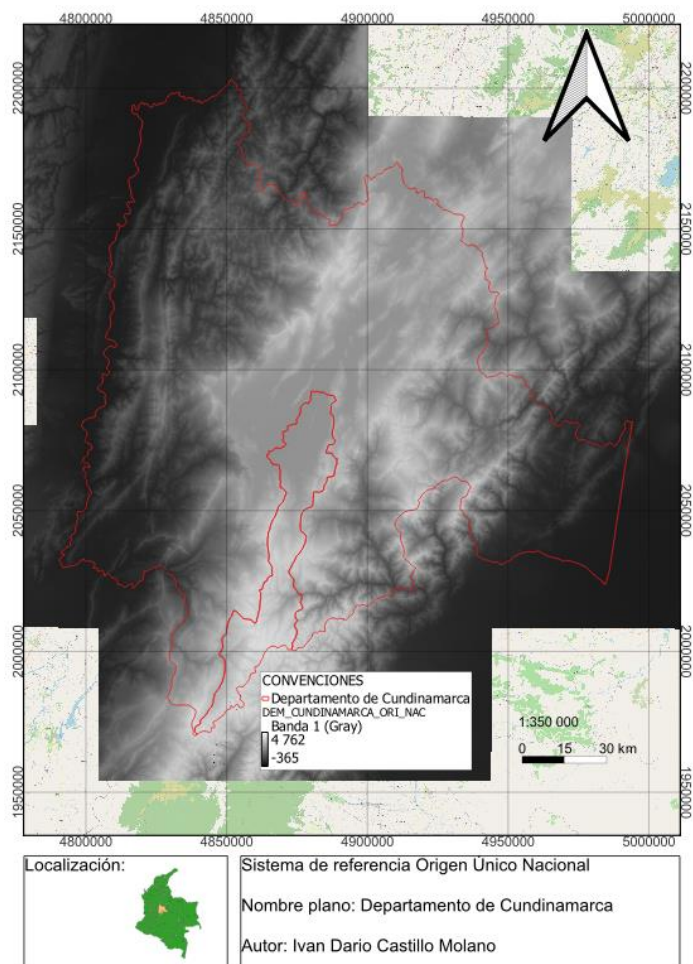


Figura 5-10 MDT del departamento de Cundinamarca sin procesar

Fuente: Autor, 2023.

El tratamiento de la información y elaboración de los planos se hace con el programa QGIS¹¹.

¹¹ QGIS es un programa de Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto licenciado bajo GNU - General Public License. QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.

5.4.1 Matemática ráster

Un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la altura sobre el nivel del mar. Los ráster son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.

La calculadora ráster en el menú Ráster de QGIS permite realizar cálculos sobre la base de valores de píxeles de un ráster existente. Los resultados están escritos en una nueva capa ráster con un formato GDAL- reconocido (QGIS, 2020).

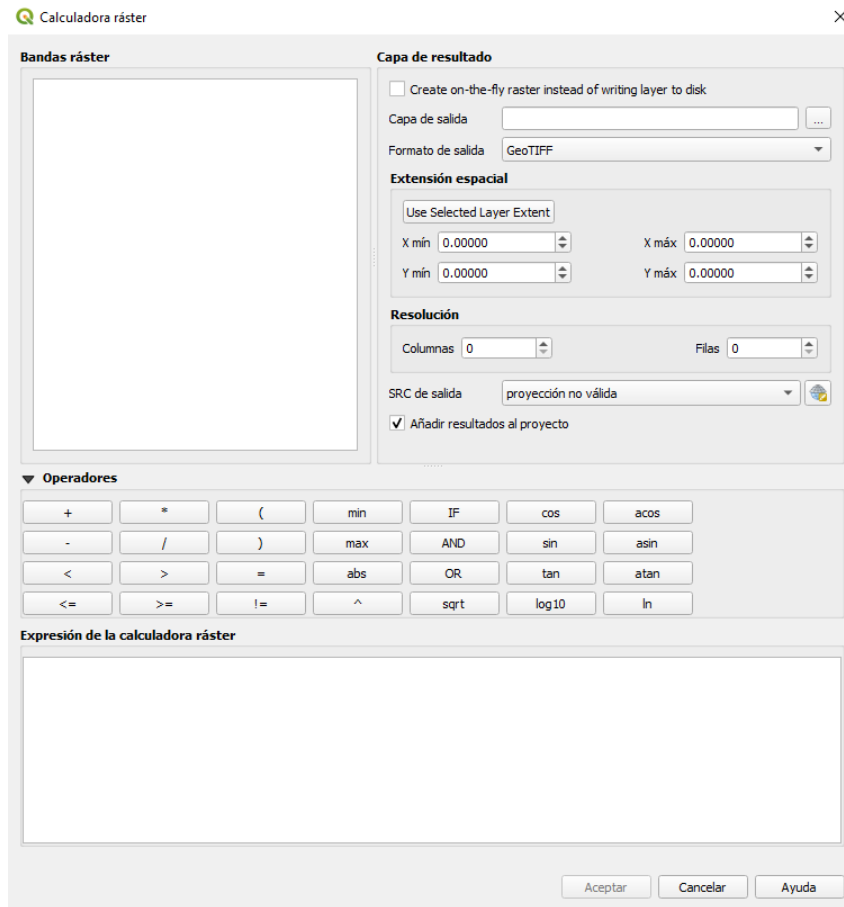


Figura 5-11 Calculadora ráster en el ambiente de QGIS

Fuente: QGIS, 2023.

En este módulo de QGIS, se ingresan los modelos de regresión para obtener los ráster de temperatura y evaporación para el departamento de Cundinamarca.

5.4.2 Interpolación IDW

Cuando se utiliza el método de la distancia inversa ponderada IDW¹², los puntos de muestreo se ponderan durante la interpolación de tal manera que la influencia de un punto en relación con otros disminuye con la distancia desde el punto desconocido que desea crear.

De acuerdo con Barón (2003), el método determina los valores utilizando una combinación de ponderación lineal de un conjunto de puntos de observación, los cuales se cargan durante la interpolación, de tal manera que la influencia de un punto con relación a otro declina con la distancia del nuevo punto.

La ponderación es asignada a los puntos de muestreo mediante la utilización de un coeficiente de ponderación que controla cómo la influencia de la ponderación decae mientras la distancia hacia el punto nuevo se incrementa. Mientras más grande sea el coeficiente de ponderación menor será el efecto que los puntos tendrán si están lejos del punto desconocido durante el proceso de interpolación. Conforme el coeficiente se incrementa, el valor de los puntos desconocidos se aproxima al valor del punto de observación más cercano (QGIS, 2023).

¹² Por sus siglas en inglés Inverse Distance Weighted

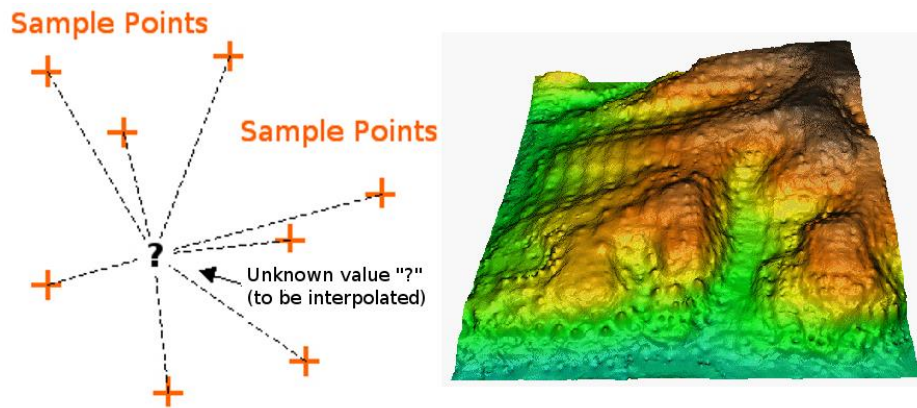


Figura 5-12 Interpolación IDW

Fuente: QGIS, 2023.

La IDW se expresa como:

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} * z_i \quad (66)$$

Donde \hat{z}_j es el valor estimado para el punto j ; n es el numero de puntos usados en la interpolación; z_i el valor en el punto i -ésimo y k_{ij} el peso asociado al dato i en el cálculo del nodo j . Los pesos k varían entre 0 y 1 para cada dato. La función de proporcionalidad entre el peso y la distancia es:

$$\hat{z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\beta}} \quad (67)$$

Aquí, $k_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^\beta}$ es la distancia inversa y β un exponente de ponderación que controla la forma en la que el peso disminuye con la distancia.

6 Resultados

El proceso para encontrar los resultados esperados de este estudio condujo al tratamiento estadístico de la información de diversas formas: análisis de las series con variadas metodologías, estudio de los datos atípicos, evaluación de diversos modelos de regresión, construcción de los ráster entre otros.

6.1 Temporalidad de los registros y selección de las estaciones de referencia

En el capítulo 5.1.1.1 ya se presentó en detalle el porqué del intervalo de tiempo de análisis elegido. La evaporación fue la variable con la que se definió la temporalidad y la cantidad de estaciones de referencia, esto debido a que, comparada con la temperatura, se disponía de una cantidad menor de información.

A partir del análisis gráfico (ver Gráfica 5-1), estadístico (ver Tabla 5-3) y geográfico (ver Figura 5-3) se fijó el periodo entre el 01/01/1991 hasta 31/12/2013 abarcando 23 años, ya que para este intervalo se encontró el mayor número de estaciones con el menor número de datos faltantes (porcentaje inferior al 30%).

Es importante considerar estos análisis como fuente de decisión, porque en este caso, la localización de las estaciones tiene un peso especialmente relevante para la creación del modelo geoespacial. Esto se ve reflejado en la deficiente distribución de las estaciones en Cundinamarca, pasando de áreas muy densamente instrumentadas (centro del departamento) a zonas con una densidad prácticamente nula; razón por la cual, se tuvieron en cuenta algunas estaciones en el oriente y noroccidente del departamento, porque en esas zonas eran las únicas con información disponible, aunque en su mayoría presentan registros faltantes por encima del 30%.

Tabla 6-1 Resumen de las estaciones seleccionadas que registran evaporación

Código	Nombre	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	Este_m	Norte_m	Altitud_m	% Datos faltantes
2120516	LA RAMADA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.869.485,92	2.077.810,53	2571	24,01%
2120540	CHECUA	RÍO CHECUA	RÍO CHECUA	4.904.556,91	2.123.469,17	2603	10,44%
2120548	LA IBERIA	EMB. SISGA	EMBALSE SISGA	4.919.742,12	2.114.631,64	2721	20,74%
2120557	LA PRIMAVERA	RÍO SUBACHOQUE	RÍO SUBACHOQUE	4.865.665,97	2.094.907,51	2623	25,59%

Código	Nombre	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	Este_m	Norte_m	Altitud_m	% Datos faltantes
2120559	APTO GUAYMARAL-USTA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.883.221,99	2.087.489,12	2603	19,18%
2120562	GUATAVITA	EMB. TOMINE	EMBALSE TOMINE	4.904.064,88	2.100.484,38	2679	16,68%
2120629	VENECIA	RÍO BOJACA	RÍO ANDES	4.844.866,94	2.093.430,98	2686	17,74%
2120630	DOÑA JUANA	RÍO TUNJUELO	RÍO TUNJUELO	4.873.870,13	2.055.439,35	2800	25,28%
2120639	LA MESA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.835.699,12	2.069.188,99	1215	21,13%
2120644	ARGELIA	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.805.789,34	2.039.738,57	315	52,46%
2120646	MESITAS	RÍO BOGOTA	RÍO BOGOTA	4.840.424,01	2.064.116,48	1057	18,97%
2120647	LA ESPERANZA	RÍO APULO	RÍO APULO	4.841.425,99	2.078.179,13	1391	34,60%
2123502	EL PLACER	RÍO MAGDALENA	Q. SECA	4.809.589,11	2.074.704,30	1335	56,24%
2306507	INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	RÍO NEGRO	RÍO PATASIA	4.874.936,56	2.128.135,25	1940	19,89%
2306516	EL ACOMODO	RÍO NEGRO	RÍO TABACAL	4.854.867,23	2.112.592,91	1394	69,47%
2306517	GUADUAS	RÍO NEGRO	RÍO GUADUERO	4.822.887,42	2.116.981,01	1493	62,08%
2401513	SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	RÍO SIMIJACA	4.904.996,07	2.167.146,79	2622	28,71%
2401515	CARRIZAL	LAGUNA SUESCA	LAG. SUESCA	4.914.971,51	2.133.079,09	2885	21,03%
2401519	NOVILLEROS	RÍO UBATE	RÍO UBATE	4.913.066,47	2.147.637,48	2590	18,41%
2401531	SAN MIGUEL DE SEMA	LAGUNA FUQUENE	RÍO TINJACA	4.920.194,86	2.168.041,41	2636	41,76%
2120541	REPRESA NEUSA	RÍO BOGOTA	RÍO NEUSA	4.892.396,75	2.125.914,68	3028	66,91%
2120565	TABIO	RÍO FRIO	RÍO FRIO	4.878.216,45	2.101.888,38	2601	27,13%
35055010	EL JAPON	Meta	Río Humea	4.966.582,59	2.041.659,02	280	27,97%
21195120	ITA VALSALICE - AUT	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.845.145,38	2.043.874,81	1460	28,70%
21205670	LA FLORIDA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.840.624,55	2.085.343,63	1915	24,91%
2401110	ISLA DEL SANTUARIO	Sogamoso	Río Suárez	4.918.634,40	2.162.174,27	2580	37,22%
23035020	AEROPUERTO PALANQUERO	Medio Magdalena	Directos al Magdalena entre Ríos Seco y Negro (md)	4.816.752,34	2.162.831,18	172	47,51%
23065110	YACOPI - AUT	Medio Magdalena	Río Negro	4.850.000,38	2.164.160,20	1347	32,81%
35065010	GACHETA	Meta	Río Guavio	4.928.344,79	2.091.785,71	1752	22,82%
35025060	LA BOLSA	Meta	Río Guayuriba	4.891.176,87	2.063.653,31	3195	27,71%
21205660	MERCEDES - AUT	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.830.713,53	2.064.474,28	810	17,08%
21195060	PANDI	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.834.975,35	2.021.450,80	950	13,47%
21206280	ACAPULCO	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.852.196,00	2.072.382,97	2650	36,76%
21205420	TIBAITATA	Alto Magdalena	Río Bogotá	4.865.960,07	2.076.511,83	2543	12,21%
21195190	PASCA - AUT	Alto Magdalena	Río Sumapaz	4.854.490,71	2.034.389,89	2256	27,16%

Fuente: Autor, 2023.

En total fueron seleccionadas 35 estaciones (ver Tabla 6-1), de las cuales 11 tienen un porcentaje de datos de evaporación diaria faltantes superior a 30%. En la localización de las estaciones expuesta en la Figura 6-1, se confirma que la densidad es muy baja en especial al extremo oriente y extremo occidente del departamento.

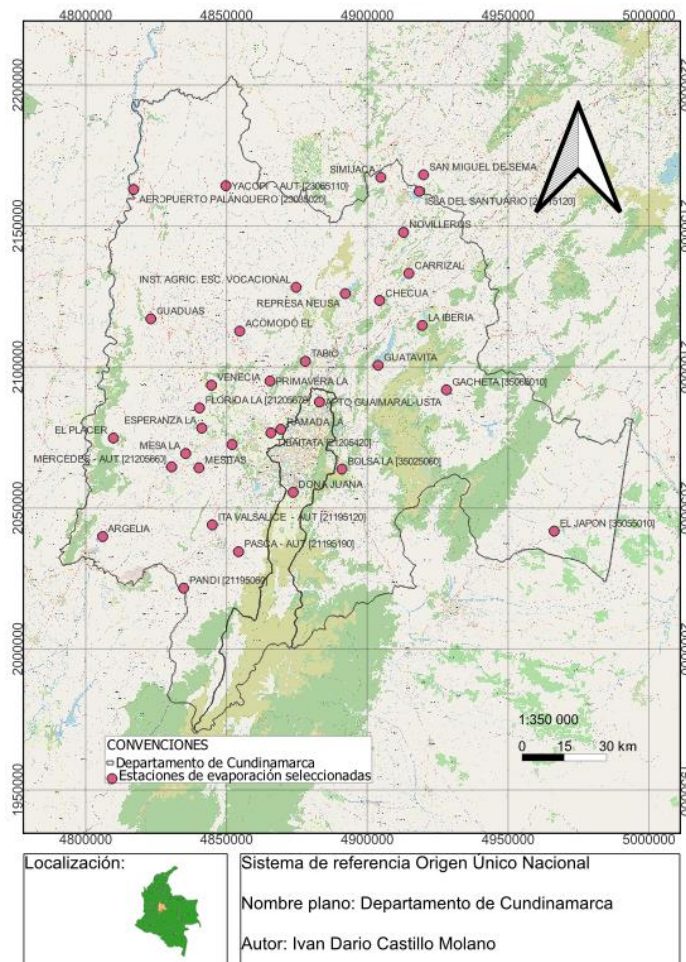


Figura 6-1 Distribución de las estaciones registradoras de evaporación seleccionadas para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

La información climatológica se encuentra en el anexo 1, la figuras en el anexo 3 y los shapes de las estaciones en el anexo 2.

6.2 Parámetros climáticos para el cálculo de la ETo

A pesar de que, en el departamento de Cundinamarca se ubica un amplio número de estaciones meteorológicas, solo 18 de estas contenían los parámetros climáticos requeridos para el cálculo de la ETo. Estas estaciones se presentan en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2 Estaciones disponibles para el cálculo de la ETo en el departamento de Cundinamarca

Código	Nombre	Responsable	Latitud	Longitud	Este_m	Norte_m	Altitud_m
21195120	ITA VALSALICE – AUT	IDEAM	4,40	-74,40	4.845.145,38	2.043.874,81	1.460,00
21195190	PASCA – AUT	IDEAM	4,31	-74,31	4.854.490,71	2.034.389,89	2.256,00
2120559	APTO GUAYMARAL-USTA	CAR	4,79	-74,05	4.883.222,24	2.087.489,12	2.603,00
2120540	CHECUA	CAR	5,12	-73,86	4.904.557,40	2.123.469,05	2.603,00
2120630	DOÑA JUANA	CAR	4,50	-74,14	4.873.870,25	2.055.439,26	2.800,00
2120561	EL MUÑA	CAR	4,33	-74,15	4.872.439,14	2.036.558,91	2.565,00
2306507	INST. AGRIC. ESC VOCACIONAL PACHO	CAR	5,16	-74,13	4.874.936,93	2.128.135,62	1.940,00
2306517	GUADUAS	CAR	5,06	-74,60	4.822.887,18	2.116.980,98	1.493,00
2120647	LA ESPERANZA	CAR	4,71	-74,43	4.841.425,75	2.078.178,76	1.391,00
2120548	LA IBERIA	CAR	5,04	-73,72	4.919.741,63	2.114.632,10	2.721,00
2120639	LA MESA	CAR	4,62	-74,48	4.835.699,12	2.069.189,11	1.215,00
2120557	LA PRIMAVERA	CAR	4,86	-74,21	4.865.666,46	2.094.907,38	2.623,00
2120646	MESITAS	CAR	4,58	-74,44	4.840.423,51	2.064.116,08	1.057,00
2401519	NOVILLEROS	CAR	5,34	-73,78	4.913.066,10	2.147.637,85	2.590,00
2401531	SAN MIGUEL DE SEMA	CAR	5,52	-73,72	4.920.196,18	2.168.040,52	2.636,00
2401513	SIMIJACA	CAR	5,51	-73,86	4.904.995,82	2.167.146,70	2.622,00
2120565	TABIO	CAR	4,92	-74,10	4.878.216,82	2.101.888,11	2.601,00
2120629	VENECIA	CAR	4,84	-74,40	4.844.866,70	2.093.431,10	2.686,00

Fuente: Autor, 2023.

Del total de estaciones, 16 están bajo jurisdicción de la CAR y 2 del IDEAM. La diferencia en cantidad radica en que, en el IDEAM solo esas estaciones registran velocidad del viento con un número suficiente de datos para el análisis¹³.

La distribución de estas estaciones a lo largo del departamento de Cundinamarca se puede ver en la Figura 6-2. La tendencia en cuanto a que la mayoría se ubica en la zona central del departamento se mantiene, mientras que en la zona más occidental solo una (Guaduas) y en la zona oriental ninguna.

¹³ En general, había poca información disponible de velocidad del viento, convirtiéndose en la principal limitante para el cálculo de la ETo.

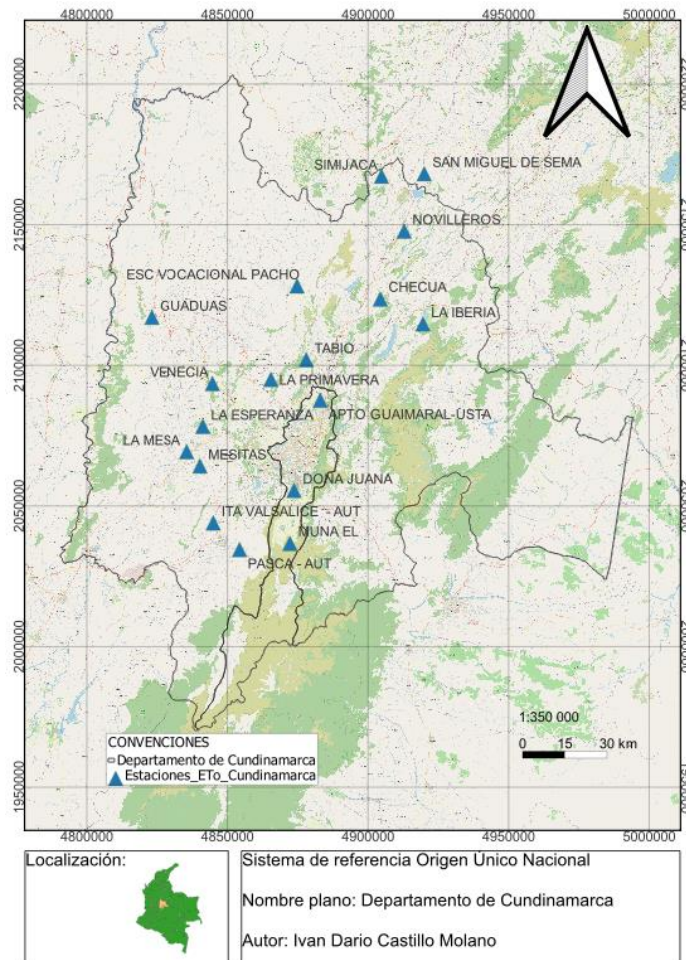


Figura 6-2 Estaciones en Cundinamarca con registros de los parámetros requeridos para calcular la ETo

Fuente: Autor, 2023.

6.2.1 Temperatura máxima

En la Tabla 6-3 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes de las series de las estaciones utilizadas para estimar la ETo. Se identifica que 8 estaciones tienen un porcentaje de datos faltantes superior al 30%, mientras que solo Checua tiene un porcentaje inferior al 10%. En promedio, hay un 28,2% de datos faltantes.

Tabla 6-3 Valores estadísticos de la temperatura máxima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Estación	Máximo °C	Promedio °C	Mínimo °C	Desviación estándar	Datos Faltantes
Mesitas	37,00	27,03	15,50	2,33	13,62%
La Mesa	34,20	26,77	16,20	2,21	13,95%
La Esperanza	36,00	24,63	16,50	2,40	32,00%
Ita Valsalice	33,20	24,62	19,00	1,60	34,82%
Guaduas	40,00	28,41	16,90	2,60	56,27%
Inst. Agric. Esc. Vocacional	33,00	22,86	9,00	2,82	13,58%
Pasca	26,40	19,74	14,80	1,59	34,47%
El Muña	27,00	19,15	12,50	2,02	66,61%
Novilleros	28,50	19,41	10,00	2,11	17,82%
Apto Guaymaral	29,00	19,85	6,00	2,89	20,00%
Checuá	31,00	19,95	5,00	2,50	6,12%
Tabio	27,10	20,52	13,20	2,13	61,43%
Simijaca	31,20	19,79	2,10	2,34	25,33%
La Primavera	36,00	19,25	9,90	2,38	14,16%
San Miguel de Sema	35,60	20,30	9,90	2,84	30,02%
Venecia	26,00	16,52	1,00	2,80	16,52%
La Iberia	31,00	18,32	-1,80	2,86	17,71%
Doña Juana	30,00	17,10	3,00	2,36	33,04%
Máximo	40,00	28,41	19,00		
Promedio	31,79	21,34	9,93	2,38	28,19%
Mínimo	26,00	16,52	-1,80		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de temperatura máxima se registró en la estación de Guaduas con 40°C y el valor de temperatura máxima mínima en La Iberia con -1,8°C. La temperatura máxima promedio es de 31,8°C y la desviación estándar de 2,4°C. En la mayoría de los casos, los valores máximos promedio se presentan en diciembre, enero y febrero y, los valores mínimos promedio en julio y agosto.

En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor $-P^{14}$ para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-4).

Tabla 6-4 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para temperatura máxima en el cálculo de ETo

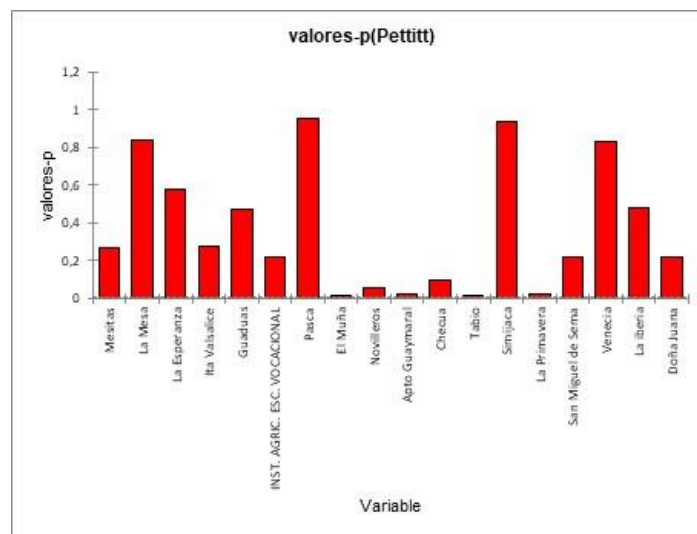
Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Mesitas	0,266
La Mesa	0,840

¹⁴ El valor-P se utiliza para decidir si la hipótesis nula H_0 se rechaza o se mantiene (no se rechaza). Si el valor p es menor que el nivel de significación definido, se rechaza la hipótesis nula, de lo contrario no.

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
La Esperanza	0,581
Ita Valsalce	0,278
Guaduas	0,471
Inst. Agric. Esc. Vocacional	0,221
Pasca	0,955
El Muña	0,017
Novilleros	0,058
Apto Guaymaral	0,025
Checuá	0,098
Tabio	0,017
Simijaca	0,936
La Primavera	0,024
San Miguel de Sema	0,218
Venecia	0,833
La Iberia	0,477
Doña Juana	0,219

Fuente: Autor, 2023.

Las estaciones con el valor – P más bajo fueron El Muña y Tabio con 0,017 seguidas de La Primavera con 0,024 y Apto Guaymaral con 0,025 (ver Gráfica 6-1).



Gráfica 6-1 Valores P para la prueba Pettitt de las series de temperatura máxima utilizadas para el cálculo de ETo

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de temperatura máxima (ver anexo 4).

6.2.2 Temperatura mínima

En la Tabla 6-5 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes. Se identifica que 6 estaciones tienen un porcentaje de datos faltantes superior al 30%, mientras que solo Checua tiene un porcentaje inferior al 10%. En promedio, hay un 27,2% de datos faltantes.

Tabla 6-5 Valores estadísticos de la temperatura mínima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Estación	Máximo °C	Promedio °C	Mínimo °C	Desviación estándar	Datos Faltantes
Mesitas	28,00	20,31	11,90	1,74	13,89%
La Mesa	29,00	19,05	9,00	1,69	14,34%
La Esperanza	32,30	17,81	11,00	1,91	32,83%
Ita Valsalice	19,40	15,98	11,20	1,25	29,43%
Guaduas	29,50	18,97	11,00	1,86	55,61%
Inst. Agric. Esc. Vocacional	22,10	10,66	-6,20	3,54	13,70%
Pasca	15,00	10,85	1,80	1,65	19,59%
El Muña	14,00	7,92	0,00	2,34	66,68%
Novilleros	19,00	7,79	-5,50	3,16	18,43%
Apto Guaymaral	22,50	7,04	-10,00	2,94	21,34%
Checua	21,00	8,21	-4,00	2,93	6,08%
Tabio	15,00	6,89	0,00	2,64	60,79%
Simijaca	28,80	8,46	-4,30	3,14	25,02%
La Primavera	28,00	6,74	-7,00	3,42	13,49%
San Miguel de Sema	29,10	9,33	-4,00	3,55	31,09%
Venecia	19,90	8,59	0,50	2,12	15,78%
La Iberia	23,00	7,44	-7,80	3,00	17,70%
Doña Juana	23,60	8,83	1,00	1,97	33,13%
Máximo	32,30	20,31	11,90		
Promedio	23,29	11,16	0,48	2,49	27,16%
Mínimo	14,00	6,74	-10,00		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de temperatura mínima se registró en la estación de Apto Guaymaral con -10°C y el valor de temperatura mínima máxima en La Esperanza con $32,3^{\circ}\text{C}$. La temperatura mínima promedio es de $11,2^{\circ}\text{C}$ y la desviación estándar de $2,5^{\circ}\text{C}$. En la mayoría de los casos, los valores mínimos promedio se presentan en diciembre y enero y, los valores máximos promedio en abril y mayo.

En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. A excepción de la estación Mesitas, el valor $-P$ para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-6). Los datos de la estación Mesitas resultaron no homogéneos, sin embargo, comparando el patrón estacional con respecto a La Mesa son muy parecidos, indicando que las series se

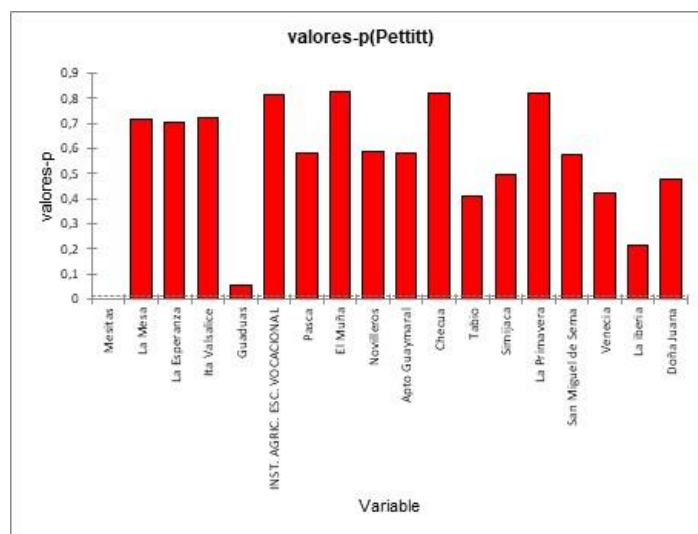
pueden emplear. Otro factor para esta decisión es que todas las series están incompletas por lo que no es factible un método de homogenización con resultados confiables.

Tabla 6-6 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para temperatura mínima en el cálculo de ETo

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Mesitas	<0.0001
La Mesa	0,716
La Esperanza	0,702
Ita Valsalice	0,721
Guaduas	0,054
Inst. Agric. Esc. Vocacional	0,812
Pasca	0,584
El Muña	0,827
Novilleros	0,584
Apto Guaymaral	0,580
Checua	0,821
Tabio	0,408
Simijaca	0,496
La Primavera	0,822
San Miguel de Sema	0,574
Venecia	0,420
La iberia	0,214
Doña Juana	0,479

Fuente: Autor, 2023.

La estación con el valor – P más bajo después de Mesitas fue Guaduas con 0,054 (ver Gráfica 6-2).



Gráfica 6-2 Valores P para la prueba Pettitt de las series de temperatura mínima utilizadas para el cálculo de ETo

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de temperatura mínima (ver anexo 4).

6.2.3 Humedad relativa máxima

En la Tabla 6-7 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes, para este parámetro solo se contó con información de las estaciones Ita Valsalice y Pasca. Se identifica que Ita Valsalice tiene un porcentaje de datos faltantes superior al 30% (39,8%), mientras que Pasca tiene un porcentaje 24%. En promedio, hay un 31,9% de datos faltantes.

Tabla 6-7 Valores estadísticos de la humedad relativa máxima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Estación	Máximo %	Promedio %	Mínimo %	Desviación estándar	Datos Faltantes
Ita Valsalice	100,00	86,78	53,00	7,78	39,82%
Pasca	100,00	90,14	61,00	5,32	24,01%
Máximo	100,00	90,14	61,00		
Promedio	100,00	88,46	57,00	6,55	31,91%
Mínimo	100,00	86,78	53,00		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de humedad relativa máxima registrado es del 100% y el valor de humedad relativa máxima mínima de 53% en la estación Ita Valsalice. La humedad relativa máxima promedio es de 88,5% y la desviación estándar de 6,6%. Los valores máximos promedio se presentan en abril y mayo y, los valores mínimos promedio en septiembre.

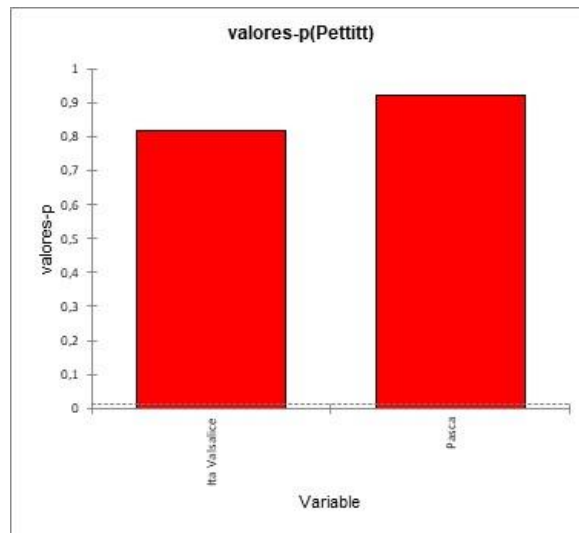
En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor - P para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-8).

Tabla 6-8 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para humedad relativa máxima en el cálculo de ETo

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Ita Valsalice	0,820
Pasca	0,924

Fuente: Autor, 2023.

Los valores - P se representan en la Gráfica 6-3.



Gráfica 6-3 Valores P para la prueba Pettitt de las series de humedad relativa máxima utilizadas para el cálculo de ETo

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de humedad relativa máxima (ver anexo 4).

6.2.4 Humedad relativa media

En la Tabla 6-9 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes de las series. Se identifica que 6 estaciones tienen un porcentaje de datos faltantes superior al 30%, mientras que solo Checua tiene un porcentaje inferior al 10%. En promedio, hay un 31,8% de datos faltantes.

Tabla 6-9 Valores estadísticos de la humedad relativa media de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Estación	Máximo %	Promedio %	Mínimo %	Desviación estándar	Datos Faltantes
Mesitas	99,00	75,13	31,00	9,91	16,66%
La Mesa	99,00	74,13	30,00	12,12	22,03%
La Esperanza	100,00	77,26	31,00	10,31	32,31%
Guaduas	99,00	82,25	44,00	9,92	64,27%
Inst. Agric. Esc. Vocacional	99,00	77,94	31,00	10,45	15,81%
El Muña	98,00	76,79	39,00	9,89	66,02%
Novilleros	100,00	72,99	26,00	11,55	20,76%
Apto Guaymaral	99,00	73,82	33,00	10,37	32,44%
Checua	98,00	72,33	31,00	10,14	9,46%
Tabio	96,00	64,75	32,00	10,24	74,57%
Simijaca	98,00	68,29	23,00	11,81	26,35%
La Primavera	100,00	77,07	37,00	9,80	24,87%
San Miguel de Sema	98,00	71,70	32,00	10,02	25,76%
Venecia	100,00	81,36	33,00	10,56	27,10%
La iberia	99,00	81,04	30,00	8,02	18,25%
Doña Juana	99,00	72,06	10,00	11,06	32,09%
Máximo	100,00	82,25	44,00		
Promedio	98,81	74,93	30,81	10,39	31,80%
Mínimo	96,00	64,75	10,00		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de humedad relativa media máxima se registró en las estaciones de La Esperanza, Novilleros, La Primavera y Venecia con 100% y el valor de humedad relativa media mínima en Doña Juana con 10%. La humedad relativa media promedio es de 74,9% y la desviación estándar de 10,4%. En la mayoría de los casos, los valores medios máximos promedio se presentan en abril y noviembre y, los valores medios mínimos promedio en agosto.

En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor - P para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-10).

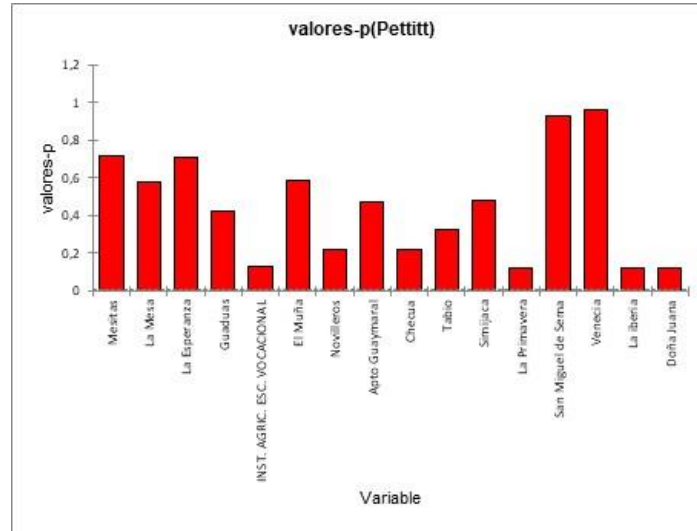
Tabla 6-10 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettit para humedad relativa media en el cálculo de ETo

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Mesitas	0,720
La Mesa	0,579
La Esperanza	0,713
Guaduas	0,421
Inst. Agric. Esc. Vocacional	0,129
El Muña	0,588
Novilleros	0,220
Apto Guaymaral	0,474
Checua	0,217
Tabio	0,322
Simijaca	0,484
La Primavera	0,124

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
San Miguel de Sema	0,932
Venecia	0,962
La iberia	0,118
Doña Juana	0,125

Fuente: Autor, 2023.

Las estaciones con el valor – P más bajo fueron La Iberia con 0,118 y Doña Juana con 0,125 (ver Gráfica 6-4).



Gráfica 6-4 Valores P para la prueba Pettitt de las series de humedad relativa media utilizadas para el cálculo de ETo

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de humedad relativa media (ver anexo 4).

6.2.5 Humedad relativa mínima

En la Tabla 6-11 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes, para este parámetro solo se contó con información de las estaciones Ita Valsalice y Pasca. Se identifica que Ita Valsalice tiene un porcentaje de datos faltantes superior al 30% (39,8%), mientras que Pasca tiene un porcentaje 24%. En promedio, hay un 31,9% de datos faltantes.

Tabla 6-11 Valores estadísticos de la humedad relativa mínima de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Estación	Máximo %	Promedio %	Mínimo %	Desviación estándar	Datos Faltantes
Ita Valsalice	100,00	70,41	18,00	10,43	39,80%
Pasca	100,00	78,86	24,00	7,75	24,01%
Máximo	100,00	78,86	24,00		
Promedio	100,00	74,64	21,00	9,09	31,91%
Mínimo	100,00	70,41	18,00		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de humedad relativa mínima registrado es del 18% en la estación Ita Valsalice y el valor de humedad relativa mínima máxima de 100% en ambas. La humedad relativa mínima promedio es de 74,6% y la desviación estándar de 9,1%. Los valores máximos promedio se presentan en abril y mayo y, los valores mínimos promedio en septiembre.

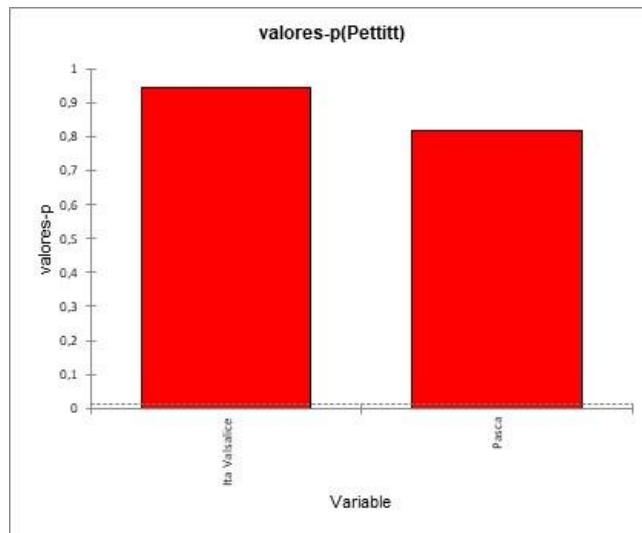
En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor - P para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-12).

Tabla 6-12 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para humedad relativa mínima en el cálculo de ETo

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Ita Valsalice	0,946
Pasca	0,819

Fuente: Autor, 2023.

Los valores - P se representan en la Gráfica 6-5.



Gráfica 6-5 Valores P para la prueba Pettitt de las series de humedad relativa mínima utilizadas para el cálculo de ETo

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de humedad relativa máxima (ver anexo 4).

6.2.6 Velocidad del viento

En la Tabla 6-13 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes de las series. Se identifica que 13 estaciones tienen un porcentaje de datos faltantes superior al 30% y ninguna tiene un porcentaje inferior al 10%. En promedio, hay un 42,8% de datos faltantes. Aquí se aprecia por qué las series de velocidad del viento fueron la principal limitante en la cantidad de estaciones seleccionadas: la mayoría de las estaciones tenía un alto porcentaje de información sin registrar.

Tabla 6-13 Valores estadísticos de la velocidad del viento de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETO

Estación	Máximo m/s	Promedio m/s	Mínimo m/s	Desviación estándar	Datos Faltantes
Mesitas	4,50	2,03	0,90	0,47	18,59%
La Mesa	3,50	1,49	0,50	0,38	43,41%
La Esperanza	4,30	1,86	0,50	0,45	36,27%
Ita Valsalice	3,71	2,29	1,07	0,44	88,75%
Guaduas	3,30	1,48	0,60	0,33	86,25%
Inst. Agric. Esc. Vocacional	6,70	1,66	0,30	0,42	35,46%
Pasca	3,67	1,86	0,53	0,47	88,51%
El Muña	7,60	2,01	0,00	0,71	44,26%
Novilleros	4,60	1,64	0,10	0,55	38,95%
Apto Guaymaral	4,60	1,75	0,60	0,42	41,75%
Checua	5,70	2,12	0,60	0,59	27,44%
Tabio	5,00	1,83	0,70	0,48	30,83%
Simijaca	5,60	2,25	0,70	0,55	48,11%
La Primavera	9,70	1,86	0,20	0,56	31,06%
San Miguel de Sema	5,90	2,06	0,20	0,59	22,45%
Venecia	8,30	2,64	0,90	0,83	29,31%
La iberia	6,90	2,09	0,30	0,42	25,72%
Doña Juana	11,20	4,22	1,30	1,23	34,11%
Máximo	11,20	4,22	1,30		
Promedio	5,82	2,06	0,56	0,55	42,85%
Mínimo	3,30	1,48	0,00		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de velocidad del viento máxima se registró en la estación de Doña Juana con 11,2 m/s y el valor de velocidad del viento mínima en El Muña con 0 m/s. La velocidad del viento promedio es de 2,06 m/s y la desviación estándar de 0,55 m/s. En la mayoría de los casos, los valores máximos promedio se presentan en agosto y septiembre y, los valores mínimos promedio en noviembre.

En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor $-P$ para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-14).

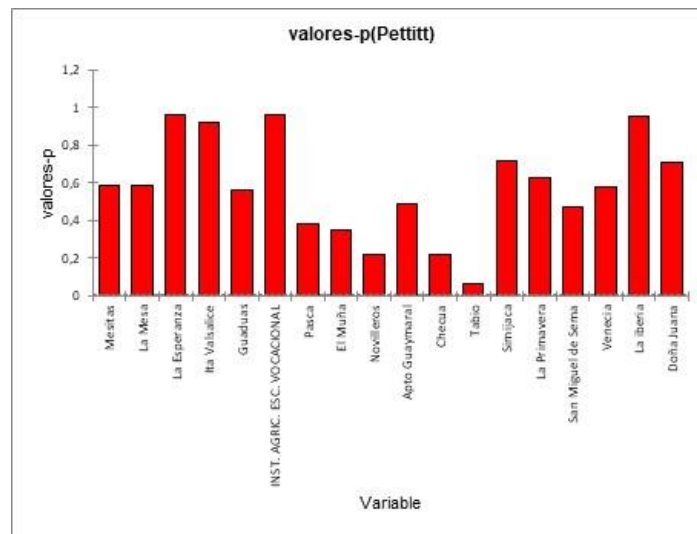
Tabla 6-14 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para velocidad del viento en el cálculo de ETO

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Mesitas	0,587
La Mesa	0,587
La Esperanza	0,960
Ita Valsalice	0,920
Guaduas	0,565
Inst. Agric. Esc. Vocacional	0,963
Pasca	0,382
El Muña	0,347
Novilleros	0,219
Apto Guaymaral	0,491

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Checuá	0,222
Tabio	0,062
Simijaca	0,718
La Primavera	0,631
San Miguel de Sema	0,473
Venecia	0,579
La Iberia	0,956
Doña Juana	0,709

Fuente: Autor, 2023.

La estación con el valor – P más bajo es Tabio con 0,062 (ver Gráfica 6-6).



Gráfica 6-6 Valores P para la prueba Pettitt de las series de velocidad del viento utilizadas para el cálculo de ETo

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de velocidad del viento (ver anexo 4).

6.2.7 Brillo solar

En la Tabla 6-15 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes de las series. Se identifica que 4 estaciones tienen un porcentaje de datos faltantes superior al 30% y 5 tienen un porcentaje inferior al 10%. En promedio, hay un 22,6% de datos faltantes.

Tabla 6-15 Valores estadísticos de brillo solar de las estaciones empleadas para el cálculo de la ETO

Estación	Máximo hr	Promedio hr	Mínimo hr	Desviación estándar	Datos Faltantes
Mesitas	11,00	4,47	0,00	2,55	12,42%
La Mesa	11,00	4,99	0,00	2,72	8,71%
La Esperanza	11,00	4,20	0,00	2,60	20,83%
Ita Valsalice	10,80	4,51	0,00	2,67	26,93%
Guaduas	12,00	5,23	0,00	2,64	47,93%
Inst. Agric. Esc. Vocacional	11,00	4,29	0,00	2,58	5,58%
Pasca	10,60	3,24	0,00	2,42	48,61%
El Muña	11,00	4,97	0,00	2,77	61,15%
Novilleros	11,00	4,16	0,00	2,58	10,57%
Apto Guaymaral	12,00	3,80	0,00	2,60	19,14%
Checua	11,00	4,91	0,00	2,70	4,32%
Tabio	11,00	4,46	0,00	2,48	72,16%
Simijaca	11,00	5,63	0,00	2,61	11,78%
La Primavera	11,00	4,28	0,00	2,55	13,36%
San Miguel de Sema	11,00	5,41	0,00	2,52	11,40%
Venecia	11,00	4,76	0,00	2,57	6,57%
La iberia	11,00	3,76	0,00	2,87	5,69%
Doña Juana	11,00	5,17	0,00	2,80	19,69%
Máximo	12,00	5,63	0,00		
Promedio	11,08	4,57	0,00	2,62	22,60%
Mínimo	10,60	3,24	0,00		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de brillo solar máximo se registró en la estación de Guaduas y Apto Guaymaral con 12 hr y el valor de brillo solar mínimo en todas las estaciones con 0 hr. El brillo solar promedio es de 4,6 hr y la desviación estándar de 2,6 hr. En la mayoría de los casos, los valores máximos promedio se presentan en diciembre y enero y, los valores mínimos promedio en mayo y junio.

En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor $-P$ para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-16).

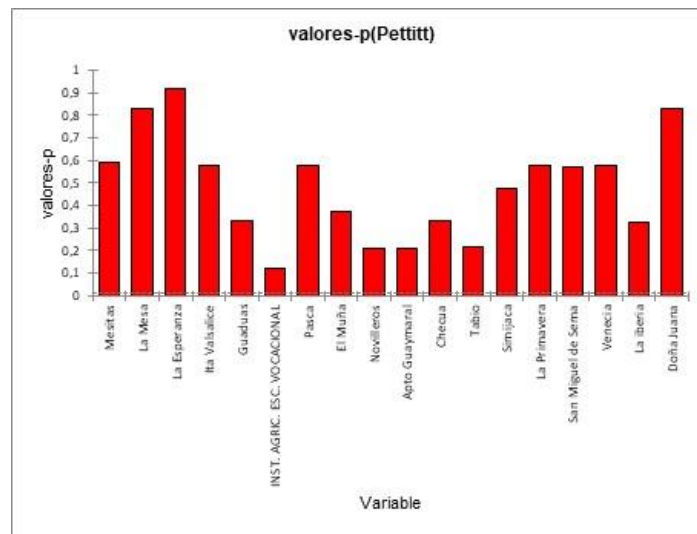
Tabla 6-16 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para brillo solar en el cálculo de ETO

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Mesitas	0,594
La Mesa	0,828
La Esperanza	0,921
Ita Valsalice	0,579
Guaduas	0,334
Inst. Agric. Esc. Vocacional	0,122
Pasca	0,578
El Muña	0,375
Novilleros	0,213
Apto Guaymaral	0,210

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Checuá	0,334
Tabio	0,215
Simijaca	0,477
La Primavera	0,579
San Miguel de Sema	0,569
Venecia	0,578
La Iberia	0,328
Doña Juana	0,827

Fuente: Autor, 2023.

La estación con el valor – P más bajo es Escuela Vocacional con 0,122 (ver Gráfica 6-7).



Gráfica 6-7 Valores P para la prueba Pettitt de las series de brillo solar utilizadas para el cálculo de ETo

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de brillo solar. En el anexo 4 se encuentran las memorias de los análisis aquí presentados.

6.3 Evapotranspiración de referencia ETo

En la Tabla 6-17 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes de las series resultantes del cálculo de la ETo por el método de la FAO Penman-Monteith. Se identifica que 8 estaciones tienen un porcentaje de datos

faltantes superior al 30%, mientras que solo Checua tiene un porcentaje inferior al 10%. En promedio, hay un 30,7% de datos faltantes.

Tabla 6-17 Valores estadísticos de la ETo a nivel diario

Estación	Máximo mm	Promedio mm	Mínimo mm	Desviación estándar	Datos Faltantes
Mesitas	6,78	3,48	0,54	0,83	13,99%
La Mesa	6,23	3,49	1,61	0,67	14,57%
La Esperanza	6,60	3,18	1,01	0,77	33,28%
Ita Valsalice	5,56	3,24	1,49	0,69	51,71%
Guaduas	6,12	3,57	0,80	0,81	57,45%
Inst. Agric. Esc. Vocacional	6,57	3,04	1,42	0,71	14,06%
Pasca	4,55	2,65	1,28	0,50	49,57%
El Muña	5,01	3,04	1,54	0,58	66,68%
Novilleros	5,09	2,87	1,53	0,58	18,81%
Apto Guaymaral	5,24	2,92	0,74	0,64	22,51%
Checua	5,44	3,12	1,60	0,64	6,39%
Tabio	5,29	3,36	1,77	0,62	61,85%
Simijaca	5,90	3,33	1,47	0,65	25,39%
La Primavera	5,06	2,90	1,24	0,59	14,74%
San Miguel de Sema	5,89	3,24	1,45	0,62	32,65%
Venecia	5,79	2,73	0,40	0,63	17,64%
La iberia	4,93	2,67	1,43	0,65	18,62%
Doña Juana	6,62	3,17	1,20	0,77	33,29%
Máximo	6,78	3,57	1,77		
Promedio	5,70	3,11	1,25	0,66	30,73%
Mínimo	4,55	2,65	0,40		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de ETo máximo corresponde a la estación de Mesitas con 6,8 mm y el valor mínimo a la estación de Venecia con 0,4 mm. La ETo promedio es de 3,11 mm y la desviación estándar de 0,66 mm.

A escala mensual, la ETo máxima total se obtuvo para la estación Guaduas con 141,97 mm y la mínima en la estación Venecia con 55,12 mm. El promedio total mensual para el departamento de Cundinamarca es de 94,53 mm.

Tabla 6-18 Valores estadísticos de la ETo totales mensuales

Estación	Máximos mm	Promedio mm	Mínimos mm
Mesitas	140,78	106,15	73,61
La Mesa	131,04	106,11	81,03
La Esperanza	127,61	96,02	67,59
Ita Valsalice	120,55	98,35	74,78
Guaduas	141,97	108,27	80,34
Inst. Agric. Esc. Vocacional	120,45	92,21	71,26
Pasca	100,17	80,43	60,37
El Muña	108,76	92,39	73,66
Novilleros	108,68	86,85	66,75
Apto Guaymaral	116,41	88,81	59,86
Checua	119,68	94,48	71,42
Tabio	130,69	103,07	80,23
Simijaca	128,18	101,59	74,63
La Primavera	113,01	88,32	67,10

Estación	Máximos mm	Promedio mm	Mínimos mm
San Miguel de Sema	124,81	98,22	77,58
Venecia	111,43	82,73	55,12
La iberia	106,51	80,91	58,86
Doña Juana	126,56	96,59	64,73
Máximo	141,97	108,27	81,03
Promedio	120,96	94,53	69,94
Mínimo	100,17	80,43	55,12

Fuente: Autor, 2023.

A escala anual, la ETo máxima total es 1.569,82 mm y la mínima 1.108,51 mm. El promedio total anual para el departamento de Cundinamarca es de 1.294,11 mm.

Tabla 6-19 Valores medios de la ETo totales anuales

Estación	Promedio mm
Mesitas	1.459,53
La Mesa	1.414,74
La Esperanza	1.314,86
Ita Valsalice	1.569,82
Guaduas	1.463,15
Inst. Agríc. Esc. Vocacional	1.214,40
Pasca	1.260,95
El Muña	1.108,51
Novilleros	1.145,27
Apto Guaymaral	1.148,09
Checua	1.439,06
Tabio	1.237,07
Simijaca	1.333,72
La Primavera	1.272,51
San Miguel de Sema	1.178,18
Venecia	1.201,04
La iberia	1.198,19
Doña Juana	1.334,93
Máximo	1.569,82
Promedio	1.294,11
Mínimo	1.108,51

Fuente: Autor, 2023.

En la mayoría de los casos, los valores máximos promedio se presentan en enero, febrero, marzo y septiembre y, los valores mínimos promedio en mayo y junio.

En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor $-P$ para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-20).

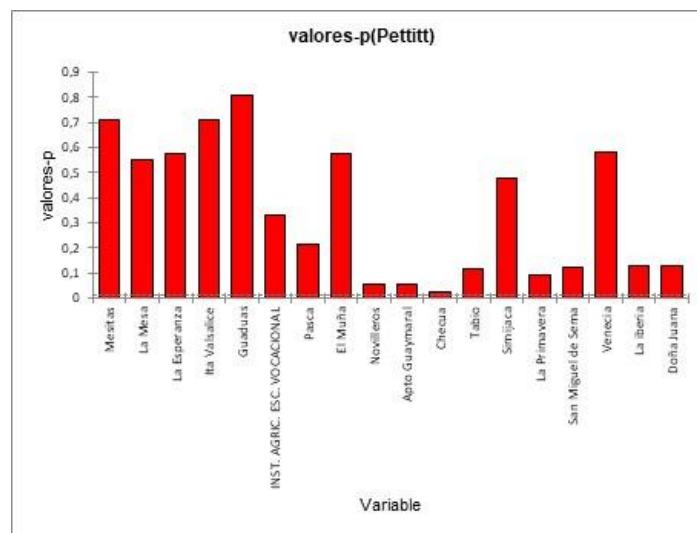
Tabla 6-20 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para la ETo

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Mesitas	0,712
La Mesa	0,552
La Esperanza	0,573

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Ita Valsalice	0,712
Guaduas	0,807
Inst. Agric. Esc. Vocacional	0,332
Pasca	0,215
El Muña	0,573
Novilleros	0,056
Apto Guaymaral	0,053
Checuá	0,024
Tabio	0,117
Simijaca	0,474
La Primavera	0,093
San Miguel de Sema	0,120
Venecia	0,578
La Iberia	0,126
Doña Juana	0,126

Fuente: Autor, 2023.

Las estaciones con el valor – P más bajo fueron Checuá con 0,024 y Apto Guaymaral con 0,053 (ver Gráfica 6-8).



Gráfica 6-8 Valores P para la prueba Pettitt de las series de ETo obtenidas

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de ETo obtenidas (ver anexo 4). El cálculo de la ETo está en el anexo 5.

6.4 Evaporación del tanque clase A

En la Tabla 6-21 se presenta el máximo, promedio, mínimo, desviación estándar y porcentaje de datos faltantes de las series de evaporación. Se identifica que 4 estaciones tienen un porcentaje de datos faltantes superior al 30%, mientras que ninguna tiene un porcentaje inferior al 10%. En promedio, hay un 28,6% de datos faltantes.

Tabla 6-21 Valores estadísticos de la evaporación

Estación	Máximo mm	Promedio mm	Mínimo mm	Desviación estándar	Datos Faltantes
Mesitas	15,00	3,64	0,00	1,91	18,97%
La Mesa	15,00	3,44	0,00	1,86	21,13%
La Esperanza	14,60	3,24	0,00	1,82	34,60%
Ita Valsalice	13,40	3,71	0,00	1,98	62,08%
Guaduas	11,00	2,94	0,00	1,56	19,90%
Inst. Agric. Esc. Vocacional	13,70	2,73	0,00	1,44	18,41%
Pasca	19,20	2,75	0,00	1,40	19,18%
El Muña	11,00	3,55	0,00	1,70	10,44%
Novilleros	11,10	3,20	0,00	1,65	28,72%
Apto Guaymaral	14,60	3,11	0,00	1,81	25,59%
Checua	13,80	2,81	0,00	1,57	17,74%
Tabio	19,10	2,76	0,00	1,73	20,74%
Simijaca	14,30	3,31	0,00	1,91	25,29%
La Primavera	19,80	2,98	0,00	1,92	27,16%
San Miguel de Sema	20,00	4,00	0,00	2,31	28,70%
Venecia	9,10	2,85	0,00	1,56	67,16%
La Iberia	16,90	2,76	0,00	1,66	41,79%
Doña Juana	19,90	2,81	0,00	1,53	27,13%
Máximo	20,00	4,00	0,00		
Promedio	15,08	3,14	0,00	1,74	28,60%
Mínimo	9,10	2,73	0,00		

Fuente: Autor, 2023.

El valor de evaporación máximo corresponde a la estación de San Miguel de Sema con 20,0 mm y el valor mínimo a todas las estaciones con 0,0 mm. La evaporación promedio es de 3,14 mm y la desviación estándar de 1,74 mm. En la mayoría de los casos, los valores máximos promedio se presentan en enero, febrero, marzo y septiembre y, los valores mínimos promedio en mayo, junio y julio.

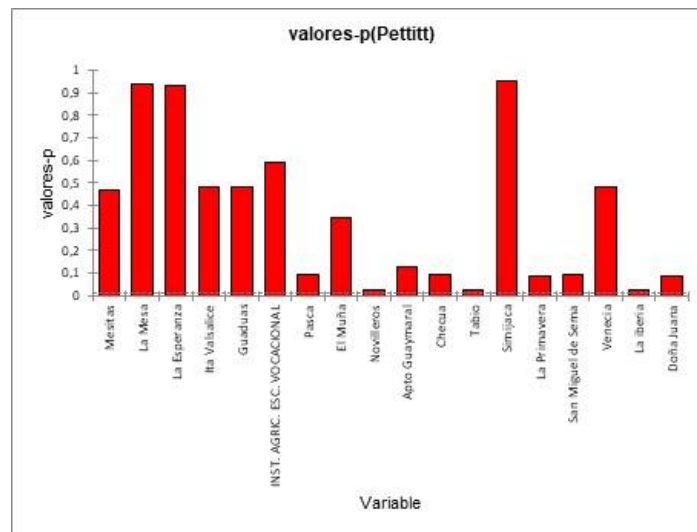
En cuanto a la homogeneidad de los datos, la hipótesis nula H_0 es que la serie es homogénea y la alternativa H_a es que hay una fecha en la que hay cambio en los datos. El valor $-P$ para cada una de las estaciones es mayor en todos los casos al nivel de significancia de 1%, por lo que se acepta H_0 (ver Tabla 6-22).

Tabla 6-22 Valor - P de cada una de las estaciones en la prueba Pettitt para las series de evaporación en el departamento de Cundinamarca

Estación	Valor-P para la prueba Pettitt
Mesitas	0,472
La Mesa	0,936
La Esperanza	0,931
Ita Valsalice	0,480
Guaduas	0,480
Inst. Agric. Esc. Vocacional	0,588
Pasca	0,093
El Muña	0,344
Novilleros	0,023
Apto Guaymaral	0,127
Checua	0,096
Tabio	0,023
Simijaca	0,952
La Primavera	0,089
San Miguel de Sema	0,093
Venecia	0,485
La iberia	0,024
Doña Juana	0,090

Fuente: Autor, 2023.

Las estaciones con el valor – P más bajo fueron Novilleros y Tabio ambas con 0,023 (ver Gráfica 6-9).



Gráfica 6-9 Valores P para la prueba Pettitt de las series de evaporación

Fuente: Autor, 2023.

Procediendo con la prueba de Grubbs para valores atípicos, no se identificaron extremos inusuales en las series de temperatura máxima. Las gráficas de los análisis estadísticos se presentan en el anexo 4.

6.5 Correlación entre la ETo y la evaporación

Fue realizada en varias etapas a modo de “prueba y error” basada en el tratamiento de los datos de las estaciones, entre la evaporación media total mensual multianual, evaporación media total anual multianual, ETo media total mensual y ETo media total anual multianual.

La fundamentación del método está basada en el hecho de que las variables climáticas que actúan sobre la ETo (temperatura, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa), lo hacen también sobre una superficie libre de agua, de manera que, si puede establecerse la relación entre ambos factores mediante un coeficiente, puede entonces utilizarse la información obtenida mediante la evaporación para pronosticar la ETo (Doorenbos & Kassan, 1979).

La relación propuesta es:

$$k_{ETo/Ev} = \frac{ETo}{Ev} \quad (68)$$

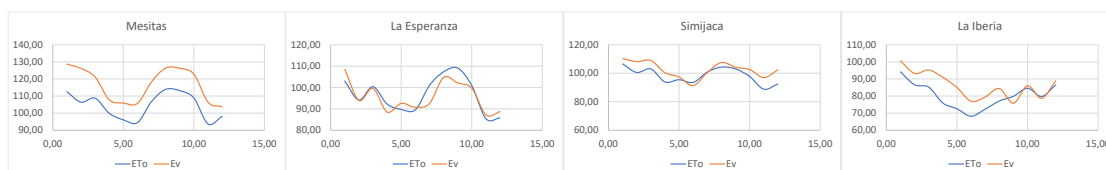
Donde $k_{ETo/Ev}$ es el coeficiente de relación, ETo la evapotranspiración de referencia en mm/mes y Ev la evaporación en mm/mes. Se espera que la ETo sea una fracción de la evaporación y, que esta relación sea muy parecida en el departamento con valores inferiores a 1 en todos los casos¹⁵.

El primer acercamiento se hizo completando la información climatología faltante con los métodos de la media ponderada¹⁶ y la distancia inversa ponderada (IDW). Al comparar los valores totales mensuales multianuales de la evaporación y la ETo, se observó que no había una tendencia que reflejará a lo largo del tiempo la relación proporcional entre los dos parámetros en el departamento de Cundinamarca.

¹⁵ La tasa de evaporación debería ser mayor o muy cercana a la tasa de ETo.

¹⁶ La media ponderada o media aritmética ponderada es una media de centralización que da una importancia distinta a cada uno de los valores sobre los que se calcula la media. En una media ponderada cada valor se multiplica por un peso, y el total es dividido por la suma de los pesos.

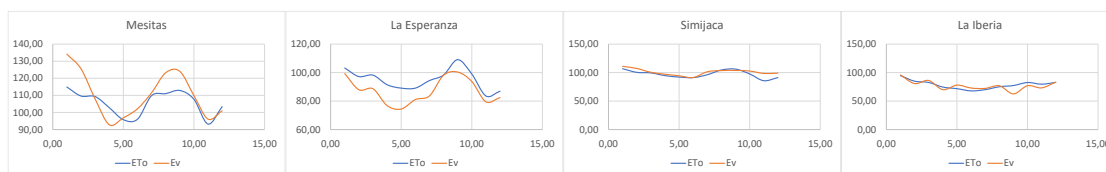
En la Gráfica 6-10 se presenta a manera de resumen los resultados para la estación de Mesitas, La Esperanza, Simijaca y La Iberia¹⁷, se observa que mientras en Mesitas existe una relación proporcional de 0,89 en promedio, en La Esperanza, Simijaca y La Iberia se cruzan entre sí arrojando en unos meses valores inferiores a 1 y en otros meses superiores a 1. Esta misma situación ocurre para las demás estaciones seleccionadas.



Gráfica 6-10 Comparación entre la evaporación y la ETo con completitud de las series de las estaciones de Mesitas, La Esperanza, Simijaca y La Iberia

Fuente: Autor, 2023.

En segunda instancia, se abordó la información climatológica sin ningún tipo de tratamiento estadístico de complementación de datos, esperando que la relación fuera la esperada. Sin embargo, esta prueba alejo aún más la hipótesis de una relación proporcional entre la evaporación y la ETo¹⁸.



Gráfica 6-11 Comparación entre la evaporación y la ETo sin tratamiento de las series de las estaciones de Mesitas, La Esperanza, Simijaca y La Iberia

Fuente: Autor, 2023.

La Gráfica 6-11 refleja que en la estación de Mesitas se pierde la relación proporcional que se tenía con la completitud de los datos, en la estación La Esperanza la ETo pasa a ser

¹⁷ La memoria de la comparación entre la evaporación y ETo completando la información faltante de todas las estaciones, se encuentra en el anexo 6 como Comparacion_Eto_Ev_completandodatos.xlsx

¹⁸ La memoria de la comparación entre la evaporación y ETo sin tratamiento de la información, se encuentra en el anexo 6 como Comparacion_Eto_Ev-Incompleta_v1

mayor que la evaporación todo el tiempo y para las estaciones Simijaca y La Iberia se tiene que la relación sería $ET_o=Ev$.

La última prueba realizada, consistió en emparejar los valores mínimos de la evaporación y los obtenidos de la ET_o (ver Tabla 6-23). Se encontró que los valores mínimos registrados de evaporación en todas las estaciones fueron 0,0 mm, pero los valores mínimos de ET_o eran superiores o iguales a 1,2 mm.

Tabla 6-23 Valores mínimos de evaporación y ET_o

Estación	Mínimos Ev mm	Mínimos ET_o mm
Mesitas	0,00	1,7
La Mesa	0,00	1,68
La Esperanza	0,00	1,64
Ita Valsalice	0,00	1,79
Guaduas	0,00	1,71
INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	0,00	1,45
Pasca	0,00	1,64
El Muña	0,00	1,54
Novilleros	0,00	1,57
Apto Guaymaral	0,00	1,59
Checua	0,00	1,69
Tabio	0,00	1,77
Simijaca	0,00	1,56
La Primavera	0,00	1,57
San Miguel de Sema	0,00	1,45
Venecia	0,00	1,41
La iberia	0,00	1,43
Doña Juana	0,00	1,2

Fuente: Autor, 2023.

Debido a esto, se decidió poner como límite inferior para los datos de evaporación de cada estación los valores mínimos de ET_o y, además, teniendo en cuenta lo descrito en el numeral 5.1.1, utilizar únicamente los meses con información diaria superior al 50% para ambas variables (aunque esto redujera el porcentaje de información disponible). Al realizar estas acciones, los valores mínimos de ambos parámetros se ven afectados denotando los datos contenidos en la Tabla 6-24.

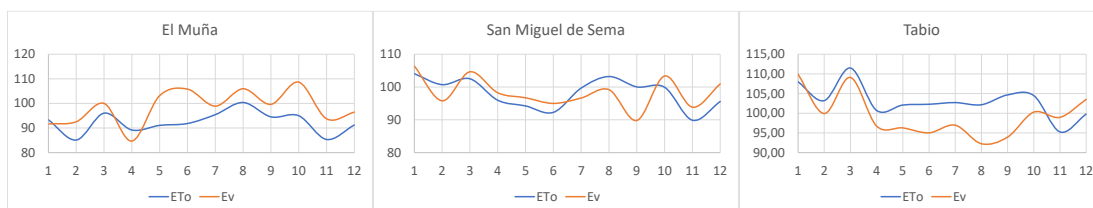
Tabla 6-24 Valores mínimos de evaporación y ET_o con tratamiento de datos

Estación	Mínimos Ev mm	Mínimos ET_o mm
Mesitas	1,70	0,54
La Mesa	1,70	1,61
La Esperanza	1,70	1,01
Ita Valsalice	1,80	1,49
Guaduas	1,80	0,80

Estación	Mínimos Ev mm	Mínimos ETo mm
INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	1,50	1,42
Pasca	1,70	1,28
El Muña	1,60	1,54
Novilleros	1,60	1,53
Apto Guaymaral	1,60	0,74
Checua	1,70	1,60
Tabio	1,80	1,77
Simijaca	1,60	1,47
La Primavera	1,60	1,24
San Miguel de Sema	1,50	1,45
Venecia	1,50	0,40
La iberia	1,50	1,43
Doña Juana	1,20	1,20

Fuente: Autor, 2023.

Emparejando los valores medios totales mensuales multianuales, 3 estaciones no cumplieron la relación proporcional, por lo que fueron descartadas del estudio: El Muña, Tabio y San Miguel de Sema. En la Gráfica 6-12 se muestra que no se ajustan a la relación esperada en el estudio.



Gráfica 6-12 Comparación entre la evaporación (mm) y la ETo (mm) tratando las series de las estaciones de El Muña, San Miguel de Sema y Tabio

Fuente: Autor, 2023.

Las 15 estaciones restantes, indican la relación proporcional esperada, claro está, que unas se ajustan mejor que otras. Como resultado, en la Gráfica 6-13 se observa que la evaporación y la ETo mantienen una estacionalidad y proporcionalidad similar.



Gráfica 6-13 Comparación entre la evaporación (mm) y la ETo (mm) tratando las series de las estaciones consideradas en el estudio

Fuente: Autor, 2023.

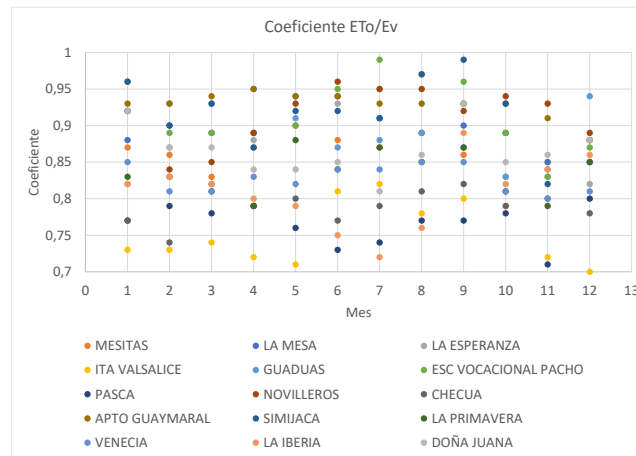
De acuerdo con lo consignado en la Tabla 6-25, el coeficiente de relación anual multianual para el departamento de Cundinamarca se encuentra en un rango entre 0,75 (Ita Valsalice) y 0,93 (Apto Guaymaral), con una media de 0,86. Puede decirse que este coeficiente no se ve afectado por la localización o la altura y, que depende netamente de la evaporación y la ETo. La evaporación y ETo están significativamente correlacionadas con un coeficiente promedio de 0,8.

Tabla 6-25 Coeficiente de relación ETo/Ev anual multianual

Estación	Altitud m	Coef. Relación ETo/Ev	Desv. Estándar coef	Coef. Correlación
Mesitas	1.057	0,87	0,02	0,92
La Mesa	1.215	0,90	0,03	0,87
La Esperanza	1.391	0,88	0,05	0,77
Ita Valsalice	1.460	0,75	0,04	0,69
Guaduas	1.493	0,89	0,04	0,94
Esc Vocacional Pacho	1.940	0,91	0,05	0,53
Pasca	2.256	0,77	0,03	0,82
Novilleros	2.590	0,91	0,04	0,92
Checua	2.603	0,79	0,02	0,90
Apto Guaymaral	2.603	0,93	0,02	0,95
Simijaca	2.622	0,91	0,05	0,50
La Primavera	2.623	0,83	0,03	0,56
Venecia	2.686	0,83	0,02	0,87
La Iberia	2.721	0,81	0,05	0,78
Doña Juana	2.800	0,87	0,03	0,84

Fuente: Autor, 2023.

En la Gráfica 6-14 se ve cómo se comportan los coeficientes de relación en todas las estaciones a nivel mensual, identificando un intervalo entre 0,77 y 0,99.



Gráfica 6-14 Coeficientes de relación entre la evaporación y la ETo mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

El valor mínimo de 0,7 se presenta en la estación Ita Valsalice en el mes de diciembre; y el valor máximo de 0,99 en la estación Escuela Vocacional en el mes de julio y en la estación Simijaca en el mes de agosto.

Tabla 6-26 Coeficientes de relación mensual multianual entre evaporación y ETo

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Mesitas	0,87	0,86	0,83	0,89	0,9	0,88	0,87	0,89	0,86	0,89	0,85	0,88
La Mesa	0,88	0,9	0,89	0,95	0,94	0,94	0,91	0,89	0,9	0,89	0,85	0,88
La Esperanza	0,82	0,87	0,89	0,88	0,9	0,93	0,95	0,89	0,93	0,83	0,83	0,82
Ita Valsalice	0,73	0,73	0,74	0,72	0,71	0,81	0,82	0,78	0,8	0,79	0,72	0,7
Guaduas	0,92	0,93	0,93	0,89	0,91	0,87	0,88	0,89	0,87	0,83	0,84	0,94
Esc Vocacional Pacho	0,96	0,89	0,89	0,87	0,9	0,95	0,99	0,97	0,96	0,89	0,83	0,87
Pasca	0,77	0,79	0,78	0,79	0,76	0,73	0,74	0,77	0,77	0,78	0,71	0,8
Novilleros	0,92	0,84	0,85	0,89	0,93	0,96	0,95	0,95	0,92	0,94	0,93	0,89
Checua	0,77	0,74	0,82	0,79	0,8	0,77	0,79	0,81	0,82	0,79	0,8	0,78
Apto Guaymaral	0,93	0,93	0,94	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,91	0,88
Simijaca	0,96	0,9	0,93	0,87	0,92	0,92	0,91	0,97	0,99	0,93	0,82	0,85
La Primavera	0,83	0,83	0,81	0,79	0,88	0,84	0,87	0,85	0,87	0,81	0,79	0,85
Venecia	0,85	0,81	0,81	0,83	0,82	0,84	0,84	0,85	0,85	0,81	0,8	0,81
La Iberia	0,82	0,83	0,82	0,8	0,79	0,75	0,72	0,76	0,89	0,82	0,84	0,86
Doña Juana	0,92	0,87	0,87	0,84	0,84	0,85	0,81	0,86	0,93	0,85	0,86	0,88
Máximo	0,96	0,93	0,94	0,95	0,94	0,96	0,99	0,97	0,99	0,94	0,93	0,94
Promedio	0,86	0,85	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87	0,89	0,85	0,83	0,85
Mínimo	0,73	0,73	0,74	0,72	0,71	0,73	0,72	0,76	0,77	0,78	0,71	0,7

Fuente: Autor, 2023.

En el anexo 6 se incluyen las memorias hechas para el cálculo de los coeficientes de relación.

6.6 Mapas de temperatura, evaporación y ETo para Cundinamarca

La elaboración de los mapas a partir del MDT en formato ráster, se hicieron con información mensual multianual e información anual multianual de estaciones con registros de temperatura y evaporación. Con los coeficientes de relación indicados en el capítulo 6.5 se hizo un mapa ráster utilizando la interpolación IDW, que multiplicado con el ráster de evaporación se obtiene el ráster de ETo.

Para esta labor, se utilizaron las estaciones enumeradas en el capítulo 6.1 que en total son 35 en donde están incluidas las estaciones empleadas en el cálculo de la ETo. A estas estaciones también se les aplicó el análisis estadístico: homogeneidad y valores atípicos.

La distribución de las 35 estaciones (indicadas en el numeral 6.1) sobre el departamento de Cundinamarca cuyas series se destinaron para la creación de los mapas de temperatura media, evaporación y ETo, se muestra en la Figura 6-3.

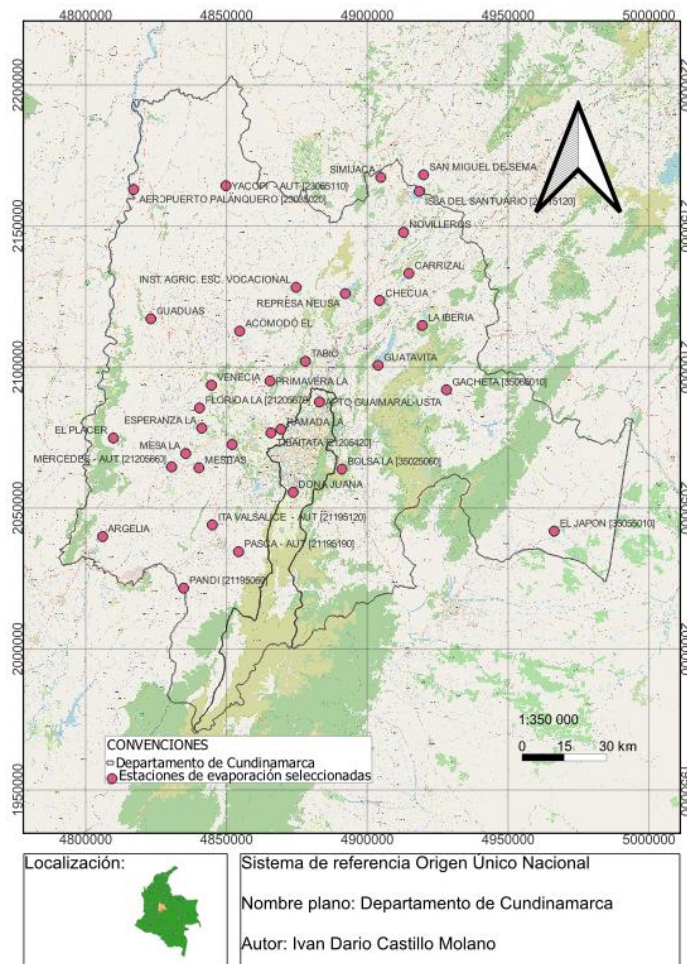


Figura 6-3 Distribución de las estaciones seleccionadas en el departamento de Cundinamarca para la construcción de los mapas

Fuente: Autor, 2023.

6.6.1 Modelo digital de terreno MDT

Debido a la extensión del departamento de Cundinamarca se debieron descargar 26 imágenes las cuales fueron combinadas para obtener un único MDT, que fue recortado como se ve en la Figura 6-4. Allí se aprecia que el departamento se encuentra a una altitud entre los 166 m y 4.099 m.

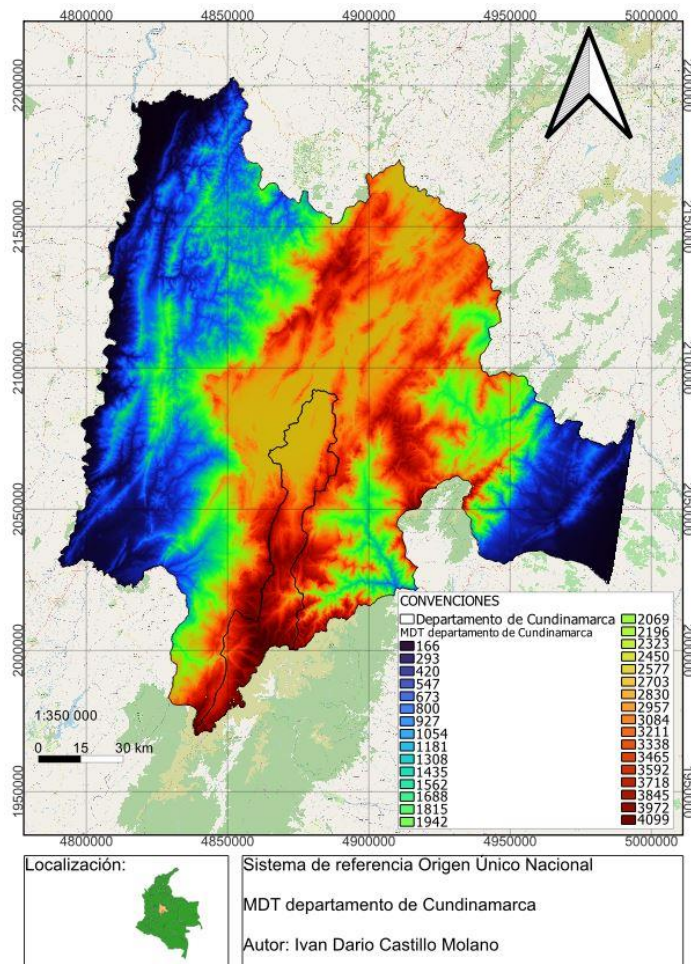


Figura 6-4 MDT del departamento de Cundinamarca procesado

Fuente: Autor, 2023.

El límite de aplicabilidad de los modelos está determinado por la altitud que abarcan las estaciones del estudio, siendo el límite inferior 172 msnm (estación Aeropuerto Palanquero) y el límite superior 3.195 msnm (estación La Bolsa).

6.6.2 Temperatura media

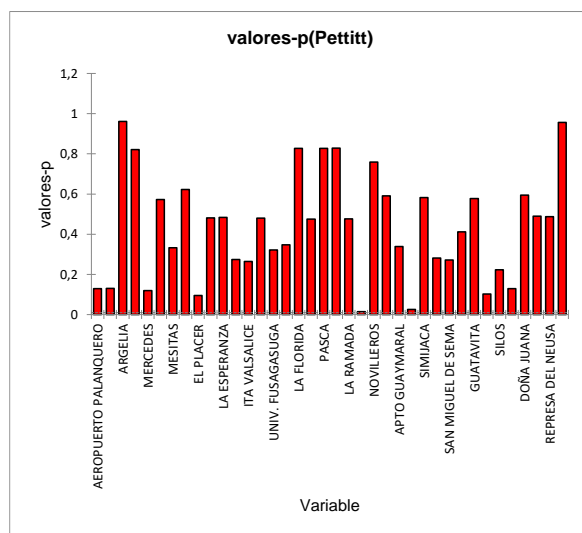
De la información contenida en la Tabla 6-27, en el departamento de Cundinamarca la temperatura media es de 17,7°C, la temperatura media máxima es de 28,2°C y la temperatura media mínima es 8,5°C.

Tabla 6-27 Temperatura media mensual y anual multianual registrada en las estaciones en el departamento de Cundinamarca

MES / ESTACION	Altitud m	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio anual
AEROPUERTO PALANQUERO	172,0	28,3	28,2	28,2	28,0	28,2	28,3	28,6	29,1	28,5	27,8	27,6	27,8	28,2
EL JAPON	280,0	26,9	27,5	27,1	26,3	25,9	25,4	25,0	25,7	26,2	26,4	26,4	26,5	26,3
ARGELIA	315,0	28,3	28,6	28,3	27,4	27,2	26,8	27,7	28,9	28,4	27,6	27,1	27,7	27,8
ESC SAMPER MADRID	541,0	26,3	26,5	26,7	27,1	26,7	26,1	26,2	26,8	26,8	26,8	26,2	25,8	26,5
MERCEDES	810,0	25,0	25,2	25,0	24,9	24,8	24,8	24,9	25,4	25,4	24,7	24,4	24,3	24,9
PANDI	950,0	24,3	24,5	24,3	24,0	23,9	24,0	24,3	24,8	24,9	24,3	23,6	23,8	24,2
MESITAS	1.057,0	23,8	24,0	23,8	23,5	23,5	23,4	23,3	23,8	24,0	23,4	23,1	23,2	23,6
LA MESA	1.215,0	22,6	22,8	22,4	22,2	22,1	22,3	22,3	23,0	23,1	22,5	22,0	22,3	22,5
EL PLACER	1.335,0	24,7	24,3	23,5	23,6	23,2	23,8	23,9	23,9	23,6	22,9	22,3	23,2	23,6
YACOPI	1.347,0	21,1	21,3	21,2	21,5	21,7	21,7	21,7	22,1	21,7	21,4	21,1	21,1	21,5
LA ESPERANZA	1.391,0	20,8	20,9	21,2	21,6	21,7	21,8	21,6	21,7	21,7	21,4	20,6	20,2	21,3
EL ACOMODO	1.394,0	22,9	22,9	23,0	22,7	22,3	22,0	22,5	22,5	22,1	22,1	23,2	22,2	22,5
ITA VALSALICE	1.460,0	20,5	20,6	20,5	20,5	20,3	20,1	20,2	20,5	20,5	20,3	20,0	20,2	20,3
GUADUAS	1.493,0	23,0	23,7	23,4	23,6	24,0	24,1	24,2	24,8	24,0	22,9	23,6	23,1	23,7
UNIV. FUSAGASUGA	1.725,0	20,1	20,0	19,7	20,0	20,1	19,8	19,4	20,0	20,7	19,8	19,2	18,8	19,8
GACHETA	1.752,0	18,2	18,9	19,1	19,1	19,0	18,5	18,0	18,4	18,5	18,7	18,9	18,4	18,6
LA FLORIDA	1.915,0	17,1	17,2	17,3	17,3	17,2	17,1	16,9	17,2	17,5	17,3	17,0	16,8	17,2
ESC VOCACIONAL PACHO	1.940,0	15,9	16,2	16,8	17,5	17,5	17,4	17,2	17,4	16,9	16,7	16,4	16,5	16,9
PASCA	2.256,0	14,9	15,1	15,4	15,4	15,6	15,4	15,2	15,4	15,5	15,4	15,2	15,0	15,3
TIBAITATA	2.543,0	12,6	13,2	13,7	14,1	14,0	13,5	13,1	13,2	13,0	13,4	13,5	13,1	13,4
LA RAMADA	2.571,0	14,7	14,7	14,8	15,2	15,1	14,6	13,9	14,1	14,2	14,8	15,3	15,2	14,7
ISLA DEL SANTUARIO	2.580,0	15,3	15,7	15,7	15,7	15,5	15,0	14,6	14,8	14,9	15,2	15,3	15,3	15,2
NOVILLEROS	2.590,0	12,9	13,5	14,3	14,4	14,2	13,5	13,2	13,0	12,8	13,7	13,9	13,7	13,6
CHECUA	2.603,0	13,5	14,1	14,7	14,8	14,7	14,2	13,6	13,6	13,5	13,9	14,3	13,7	14,0
APTO GUAYMARAL	2.603,0	13,6	13,6	14,3	14,4	14,0	13,1	12,7	13,0	13,3	13,6	13,9	13,8	13,6
TABIO	2.608,0	13,5	14,2	14,4	14,7	14,3	13,7	13,5	13,4	13,1	12,7	13,4	13,6	13,7
SIMIJACA	2.622,0	13,7	14,2	14,2	14,2	14,5	14,3	13,9	13,9	13,9	14,2	14,2	14,0	14,1
LA PRIMAVERA	2.623,0	12,4	13,0	13,3	13,7	13,7	13,2	12,8	12,8	12,9	13,1	12,9	12,2	13,0
SAN MIGUEL DE SEMA	2.636,0	13,9	14,7	14,6	15,0	14,8	14,5	14,1	14,1	13,8	14,3	14,4	14,5	14,4
ACAPULCO	2.650,0	12,8	12,7	12,9	13,0	13,1	12,9	12,5	12,6	12,9	12,8	12,9	12,7	12,8
GUATAVITA	2.679,0	12,5	13,0	13,1	13,8	13,8	13,3	12,4	12,3	12,4	13,1	13,1	13,6	13,0
VENECIA	2.686,0	12,3	12,6	12,8	13,1	13,2	13,2	11,9	11,9	12,3	12,3	12,4	12,5	12,5
SILOS	2.709,0	12,1	12,5	12,8	12,9	12,7	12,1	11,7	11,9	12,0	12,4	12,7	12,3	12,3
LA IBERIA	2.721,0	12,8	13,1	12,7	13,1	13,1	12,8	12,4	12,6	12,5	13,4	13,6	13,2	13,0
DOÑA JUANA	2.800,0	12,8	13,3	13,4	13,2	12,8	12,8	12,0	12,5	12,8	13,2	13,7	13,2	13,0
CARRIZAL	2.885,0	12,4	12,9	13,1	12,6	12,7	11,9	11,5	11,9	12,1	12,6	13,0	12,6	12,4
REPRESA DEL NEUSA	3.028,0	9,8	10,3	10,5	10,5	10,1	9,7	9,0	9,0	9,2	9,6	10,6	10,2	9,9
LA BOLSA	3.195,0	8,4	8,6	8,6	8,6	8,6	8,5	8,2	8,2	8,4	8,5	8,7	8,5	8,5
MÁXIMO		28,3	28,6	28,3	28,0	28,2	28,3	28,6	29,1	28,5	27,8	27,6	27,8	28,2
PROMEDIO		17,5	17,8	17,9	18,0	17,9	17,6	17,4	17,6	17,6	17,6	17,6	17,5	17,7
MÍNIMO		8,4	8,6	8,6	8,6	8,6	8,5	8,2	8,2	8,4	8,5	8,7	8,5	8,5

Fuente: Autor, 2023.

Apoyado en la prueba de Grubbs, no se identificaron datos atípicos para las series de temperatura media. Y, de acuerdo con los resultados de la prueba Pettitt, todas las series son homogéneas (ver Gráfica 6-15). El valor – P más bajo lo tiene la estación Isla del Santuario con 0,014.



Gráfica 6-15 Prueba Pettitt para las series de temperatura media mensual multianual

Fuente: Autor, 2023.

Terminado el análisis estadístico, luego se evalúa el modelo de regresión que mejor represente la relación entre la temperatura media mensual y anual multianual con la altitud. Como resultado, la regresión lineal simple decreciente que indica que a medida que aumenta la altitud disminuye la temperatura es la que mejor se ajusta a los datos con un factor de correlación promedio de -0,984.

$$T_{med} = \beta_0 + \beta_1 * altitud \quad (69)$$

Los coeficientes de correlación y parámetros de la regresión lineal se presentan en la Tabla 6-28.

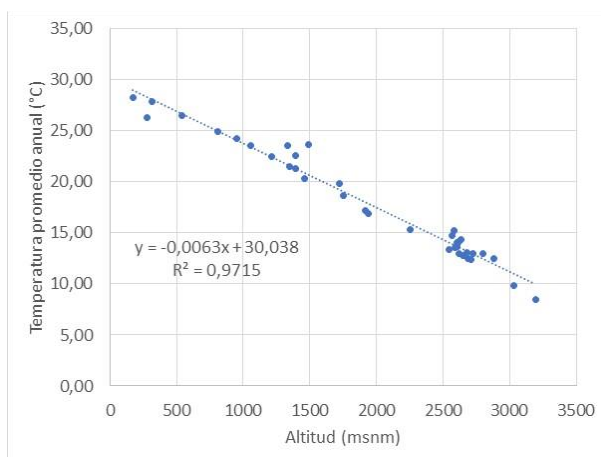
Tabla 6-28 Parámetros del modelo de regresión lineal simple para las series de temperatura media vs altitud en el departamento de Cundinamarca

Fecha	Coefficiente de correlación	β_1	β_0
Enero	-0,983628844	-0,00650473	30,32675082
Febrero	-0,983661527	-0,00639692	30,42107878
Marzo	-0,986272624	-0,00620673	30,11302818
Abril	-0,984496835	-0,00604553	29,85930132

Fecha	Coefficiente de correlación	β_1	β_0
Mayo	-0,983820081	-0,00602762	29,73857215
Junio	-0,981810234	-0,00617048	29,74974696
Julio	-0,981365892	-0,00651045	30,16698858
Agosto	-0,982621111	-0,00672583	30,85661569
Septiembre	-0,985462142	-0,0066324	30,66452042
Octubre	-0,987704928	-0,00622954	29,8512795
Noviembre	-0,982860897	-0,00593433	29,27880102
Diciembre	-0,984443691	-0,00606955	29,42891347
Anual	-0,985648363	-0,00628784	30,03796641

Fuente: Autor, 2023.

Con respecto a la altitud, para las series de temperatura media mensual multianual existe una tendencia lineal decreciente. Del mismo modo, la temperatura media anual multianual se comporta de manera lineal decreciente (ver Gráfica 6-16).



Gráfica 6-16 Modelo de regresión de temperatura media anual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

Con los modelos de regresión ajustados a los datos, en el programa QGIS se hace uso de la matemática ráster generando los mapas de temperatura media mensual multianual (ver Figura 6-5).

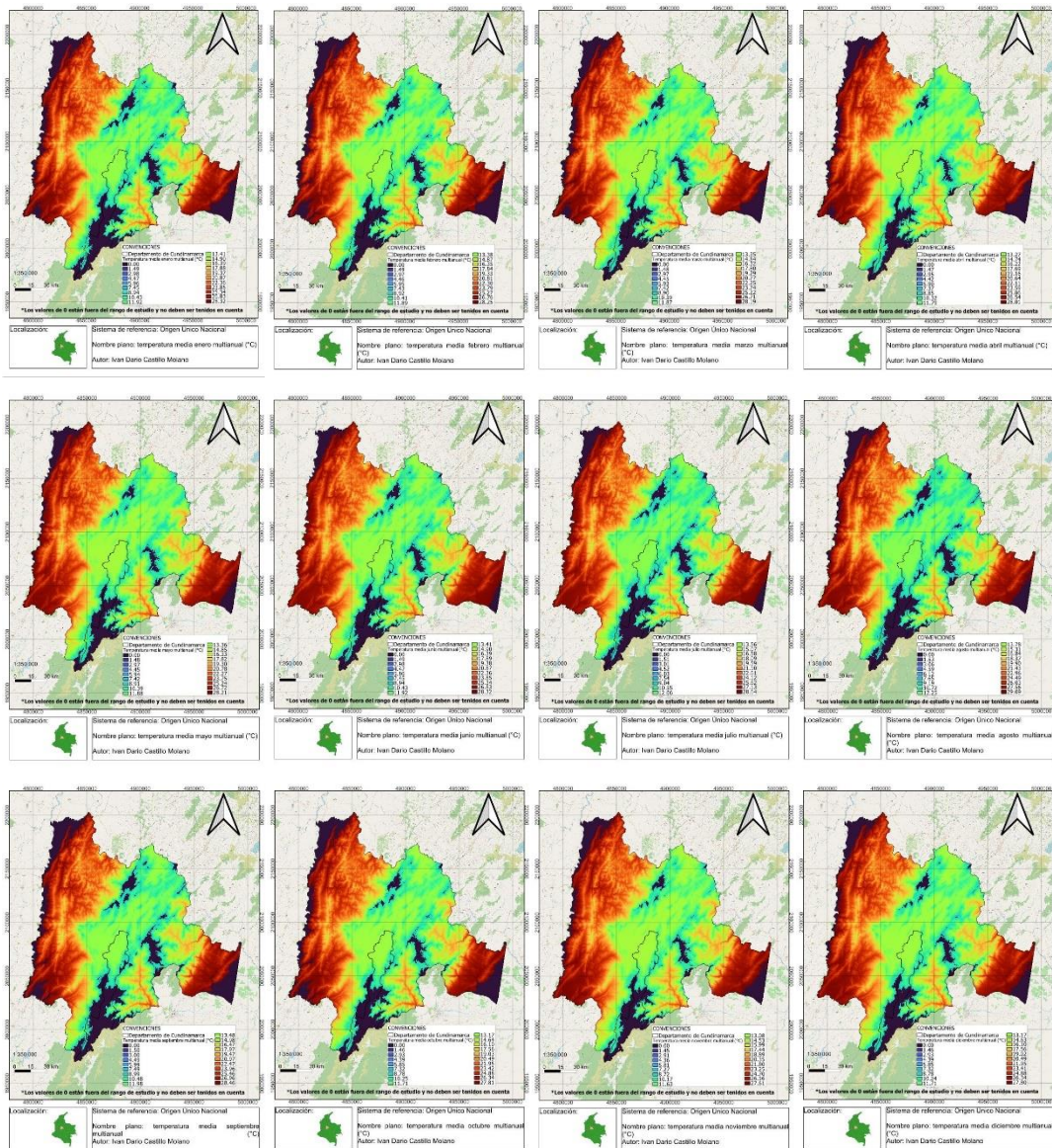


Figura 6-5 Mapas de temperatura media mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

La temperatura media mensual multianual máxima es 29,1°C y la mínima 8,2°C e históricamente se presentan en agosto.

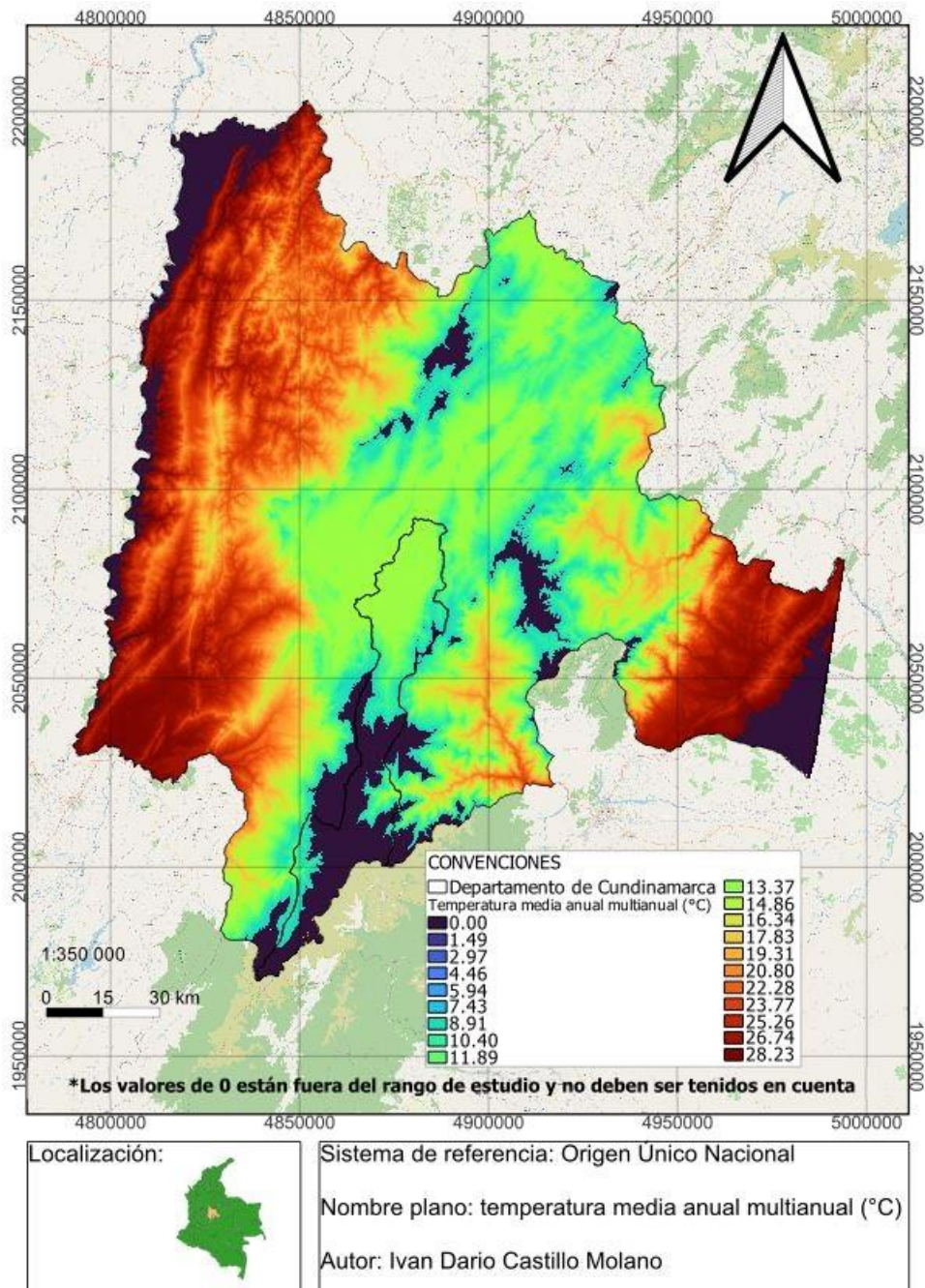


Figura 6-6 Mapa de temperatura media anual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

La temperatura media anual multianual máxima es 28,2°C y la mínima 8,5°C.

6.6.3 Evaporación

En el departamento de Cundinamarca la evaporación media total mensual es de 98,5 mm, la evaporación media total mensual multianual máxima es de 209,1 mm y la evaporación media total mensual multianual mínima es 56,8 mm (ver Tabla 6-29).

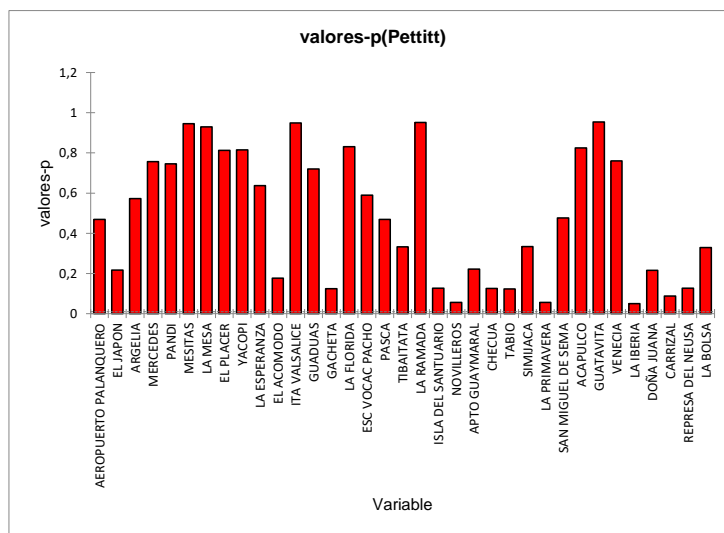
Tabla 6-29 Evaporación media total mensual y media total anual multianual registrada en las estaciones en el departamento de Cundinamarca

MES / ESTACION	Altitud m	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total anual
AEROPUERTO PALANQUERO	172,0	160,5	154,1	170,4	159,9	171,1	167,0	191,6	209,1	170,0	164,6	147,3	153,6	2.019,3
EL JAPON	280,0	161,0	159,1	148,4	131,9	132,8	117,8	126,5	137,6	140,4	152,4	138,5	146,9	1.693,4
ARGELIA	315,0	169,7	151,7	162,0	149,9	144,5	155,8	171,3	185,9	177,2	166,9	145,9	158,3	1.939,0
ESC SAMPER MADRID	541,0	136,6	130,0	131,8	115,9	111,0	106,7	127,4	145,6	143,9	134,1	114,2	123,1	1.520,5
MERCEDES	810,0	139,2	126,4	130,5	111,2	110,6	108,4	124,8	135,6	133,8	132,8	113,9	124,2	1.491,4
PANDI	950,0	121,4	116,4	112,4	98,4	98,3	101,0	110,8	122,0	117,9	109,7	96,6	103,8	1.308,8
MESITAS	1.057,0	110,4	101,0	106,2	95,2	95,7	96,8	109,6	119,9	116,1	109,6	93,0	96,7	1.250,1
LA MESA	1.215,0	106,0	98,1	101,5	91,8	98,9	113,7	122,2	130,3	121,6	107,5	85,5	93,0	1.270,0
EL PLACER	1.335,0	92,0	87,9	101,9	101,7	108,7	103,0	116,3	112,7	109,8	110,2	90,3	86,1	1.220,6
YACOPI	1.347,0	106,9	90,6	95,6	89,0	86,7	86,2	94,2	107,5	103,9	103,1	85,6	90,6	1.139,9
LA ESPERANZA	1.391,0	99,1	89,9	92,2	86,7	91,6	75,7	87,8	90,4	95,8	102,7	94,8	93,3	1.100,1
EL ACOMODO	1.394,0	132,4	114,9	117,0	112,3	102,1	96,2	105,0	116,5	121,3	121,3	112,1	117,3	1.368,4
ITA VALSALICE	1.460,0	93,4	91,9	102,0	106,7	102,5	115,1	125,4	135,0	122,9	117,4	98,3	84,4	1.295,0
GUADUAS	1.493,0	118,3	114,7	109,6	87,0	88,5	78,3	73,9	82,7	92,7	95,9	92,7	105,4	1.139,8
UNIV. FUSAGASUGA	1.725,0	69,7	66,2	70,7	65,9	67,7	65,2	69,8	77,5	81,4	77,5	65,6	65,1	842,3
GACHETA	1.752,0	89,6	87,3	94,8	86,4	83,8	82,3	86,7	90,9	91,8	90,0	78,5	81,5	1.043,7
LA FLORIDA	1.915,0	95,2	83,0	95,6	81,8	81,5	81,2	80,3	81,5	88,3	84,6	78,9	85,3	1.017,0
ESC VOCACIONAL PACHO	1.940,0	106,9	100,2	100,4	89,0	82,5	88,6	91,6	101,9	98,4	95,4	85,2	93,6	1.133,8
PASCA	2.256,0	95,5	85,6	86,9	76,3	72,1	76,1	80,3	86,9	84,6	85,7	79,3	87,2	996,5
TIBAITATA	2.543,0	112,0	106,2	108,5	95,3	91,9	89,3	97,2	96,9	96,8	93,3	87,0	100,5	1.174,8
LA RAMADA	2.571,0	94,5	95,5	98,4	82,3	72,4	68,5	71,5	76,9	81,5	84,0	71,5	80,4	977,3
ISLA DEL SANTUARIO	2.580,0	101,5	86,4	97,3	82,9	83,4	82,6	78,0	75,1	75,9	86,3	81,0	87,6	1.018,0
NOVILLEROS	2.590,0	100,9	89,3	88,8	77,4	73,9	73,1	74,1	78,5	82,0	84,2	80,3	85,0	987,6
CHECUA	2.603,0	129,8	121,6	118,7	103,4	100,0	99,0	98,6	101,5	103,7	109,2	101,4	114,0	1.300,9
APTO GUAYMARAL	2.603,0	104,9	100,7	104,2	98,9	98,1	88,5	100,8	103,4	99,4	98,8	97,3	98,4	1.193,4
TABIO	2.608,0	97,4	97,3	102,8	90,1	86,2	87,5	84,7	89,7	89,9	95,6	88,8	88,9	1.098,8
SIMIJACA	2.622,0	96,2	86,5	91,2	86,4	86,9	82,3	83,5	85,4	81,4	89,8	83,6	91,6	1.044,9
LA PRIMAVERA	2.623,0	62,8	66,9	69,5	67,6	66,0	73,6	71,2	73,3	70,2	68,6	59,5	65,5	814,6
SAN MIGUEL DE SEMA	2.636,0	98,4	89,1	97,8	91,2	92,7	88,2	91,1	92,6	88,6	94,3	91,9	91,0	1.106,8
ACAPULCO	2.650,0	89,1	82,0	88,7	83,7	81,2	78,1	83,6	87,2	91,0	90,9	80,5	84,6	1.020,5
GUATAVITA	2.679,0	100,9	91,6	93,3	84,4	75,0	71,9	73,2	76,8	72,2	83,9	80,0	87,9	991,1
VENECIA	2.686,0	115,2	105,3	111,7	98,9	100,9	95,6	92,5	97,5	103,7	109,0	97,9	101,1	1.229,3
SILOS	2.709,0	95,6	91,3	92,6	83,9	75,5	66,8	68,6	76,0	78,8	87,4	79,6	86,1	982,2
LA IBERIA	2.721,0	81,8	73,8	84,7	67,3	67,9	59,9	56,8	62,2	62,4	67,8	64,8	77,3	826,8

MES / ESTACION	Altitud m	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total anual
DOÑA JUANA	2.800,0	75,0	68,5	74,3	63,1	61,4	65,0	64,9	63,3	65,9	71,2	68,1	71,0	811,5
CARRIZAL	2.885,0	169,7	159,1	170,4	159,9	171,1	167,0	191,6	209,1	177,2	166,9	147,3	158,3	2.019,3
REPRESA DEL NEUSA	3.028,0	107,4	100,0	104,4	94,1	92,7	91,0	96,7	103,0	101,6	102,2	91,7	97,1	1.182,0
LA BOLSA	3.195,0	62,8	66,2	69,5	63,1	61,4	59,9	56,8	62,2	62,4	67,8	59,5	65,1	811,5
MÁXIMO		160,5	154,1	170,4	159,9	171,1	167,0	191,6	209,1	170,0	164,6	147,3	153,6	2.019,3
PROMEDIO		161,0	159,1	148,4	131,9	132,8	117,8	126,5	137,6	140,4	152,4	138,5	146,9	1.693,4
MÍNIMO		169,7	151,7	162,0	149,9	144,5	155,8	171,3	185,9	177,2	166,9	145,9	158,3	1.939,0

Fuente: Autor, 2023.

Apoyado en la prueba de Grubbs, no se identificaron datos atípicos para las series de evaporación media total. Y, de acuerdo con los resultados de la prueba Pettitt, todas las series son homogéneas (ver Gráfica 6-17). El valor – P más bajo lo tiene la estación La Iberia con 0,05.



Gráfica 6-17 Prueba Pettitt para las series de evaporación media total mensual multianual

Fuente: Autor, 2023.

Terminado el análisis estadístico, luego se evalúa el modelo de regresión que mejor represente la relación entre la evaporación media total mensual multianual y total anual multianual con la temperatura media mensual y anual. Como resultado, la regresión polinomial simple y la regresión de decaimiento exponencial son las que mejor se ajustan a los datos.

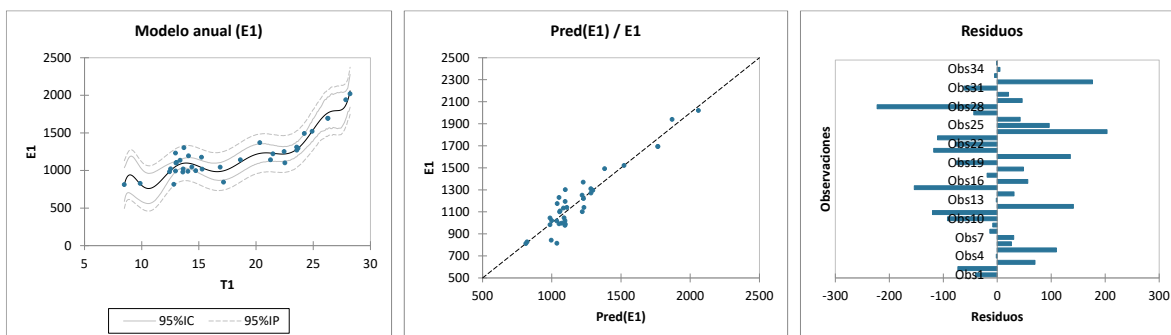
Las ecuaciones de los modelos de regresión de ajuste por mes y anual, y el valor de RMSE se presentan en la Tabla 6-30. El RMSE más bajo se obtuvo para el modelo del mes de abril, lo que significa que para ese mes se tiene la mejor predicción de evaporación total.

Tabla 6-30 Ecuaciones de los modelos de regresión de ajuste para las series de evaporación media total mensual y media total anual vs temperatura media en el departamento de Cundinamarca

Fecha	Ecuación del modelo	Tipo	RMSE
Enero	$E1 = -345800+201996*T1-51164.9*T1^2+7380.3*T1^3-668.518*T1^4+39.4667*T1^5-1.51993*T1^6+0.0368574*T1^7-0.000511189*T1^8+3.09273e-06*T1^9$	Polinomial	14,90
Febrero	$E1 = -394698+225500*T1-55915.8*T1^2+7903.23*T1^3-702.146*T1^4+40.6941*T1^5-1.53987*T1^6+0.0367181*T1^7-0.000501095*T1^8+2.98473e-06*T1^9$	Polinomial	12,35
Marzo	$E1 = -467831+266136*T1-65777.5*T1^2+9277.67*T1^3-823.552*T1^4+47.7499*T1^5-1.80988*T1^6+0.043282*T1^7-0.000593098*T1^8+3.55131e-06*T1^9$	Polinomial	10,55
Abril	$E1 = -371820+212117*T1-52536.2*T1^2+7419.77*T1^3-658.981*T1^4+38.2005*T1^5-1.44673*T1^6+0.0345513*T1^7-0.000472653*T1^8+2.82464e-06*T1^9$	Polinomial	9,10
Mayo	$E1 = 0.0118318*exp(+0.315908*T1)-1829.81*exp(-0.505803*T1)+83.2867$	Decaimiento exponencial	9,42
Junio	$E1 = 13526.2-5891*T1+1068.33*T1^2-104.381*T1^3+5.95384*T1^4-0.198816*T1^5+0.00360728*T1^6-2.74807e-05*T1^7$	Polinomial	9,33
Julio	$E1 = 9462.69-4082.39*T1+729.018*T1^2-69.6035*T1^3+3.85306*T1^4-0.124119*T1^5+0.00216141*T1^6-1.57366e-05*T1^7$	Polinomial	9,90
Agosto	$E1 = 2757.04-1084.25*T1+172.617*T1^2-13.9385*T1^3+0.606098*T1^4-0.0135264*T1^5+0.000121749*T1^6$	Polinomial	10,11
Septiembre	$E1 = 0.386428*exp(+0.192152*T1)-2150.72*exp(-0.53559*T1)+83.4671$	Decaimiento exponencial	9,44
Octubre	$E1 = 17412.2-7902.06*T1+1492.85*T1^2-151.827*T1^3+8.99912*T1^4-0.311555*T1^5+0.00584594*T1^6-4.59477e-05*T1^7$	Polinomial	9,12
Noviembre	$E1 = -426261+246009*T1-61716.9*T1^2+8838.45*T1^3-796.729*T1^4+46.9139*T1^5-1.80588*T1^6+0.0438573*T1^7-0.000610294*T1^8+3.71077e-06*T1^9$	Polinomial	9,63
Diciembre	$E1 = -554979+321953*T1-81187.9*T1^2+11688*T1^3-1059.23*T1^4+62.7114*T1^5-2.42734*T1^6+0.0592785*T1^7-0.000829474*T1^8+5.07117e-06*T1^9$	Polinomial	11,02
Anual	$E1 = -2.81751e+06+1.63919e+06*T1-413455*T1^2+59383*T1^3-5355.86*T1^4+314.856*T1^5-12.0769*T1^6+0.291766*T1^7-0.00403303*T1^8+2.43287e-05*T1^9$	Polinomial	108,94

Fuente: Autor, 2023.

Entre tanto, la evaporación media total anual multianual se comporta de forma polinomial con un buen grado de ajuste (ver Gráfica 6-18).



Gráfica 6-18 Modelo de regresión de la evaporación media total anual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

Con los modelos de regresión ajustados a los datos, en el programa QGIS se hace uso de la matemática ráster generando los mapas de evaporación media total mensual multianual (ver Figura 6-7).

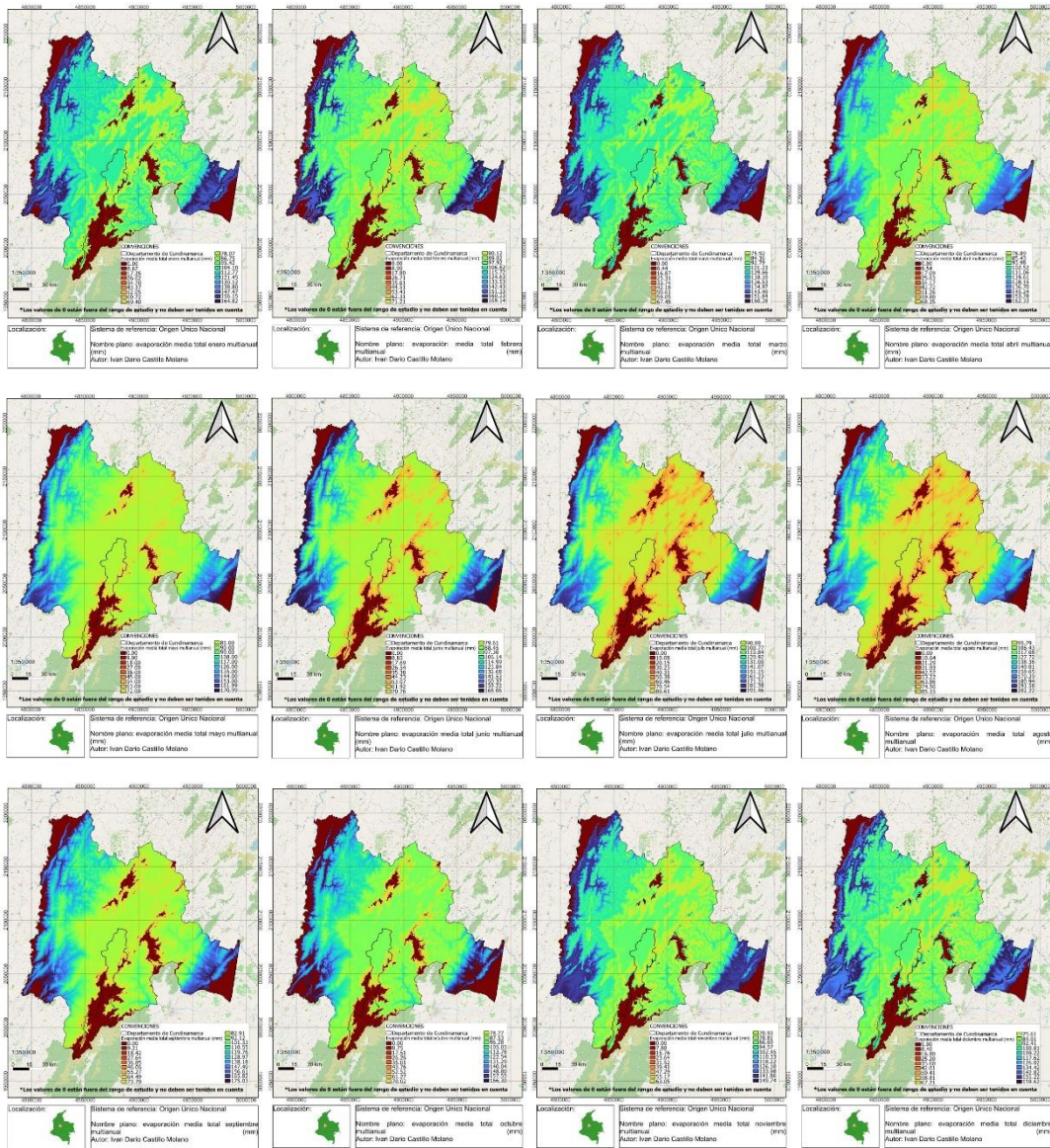


Figura 6-7 Mapas de evaporación media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

La evaporación media total mensual multianual máxima de 209,1 mm se presenta en agosto y la mínima de 56,8 mm en julio.

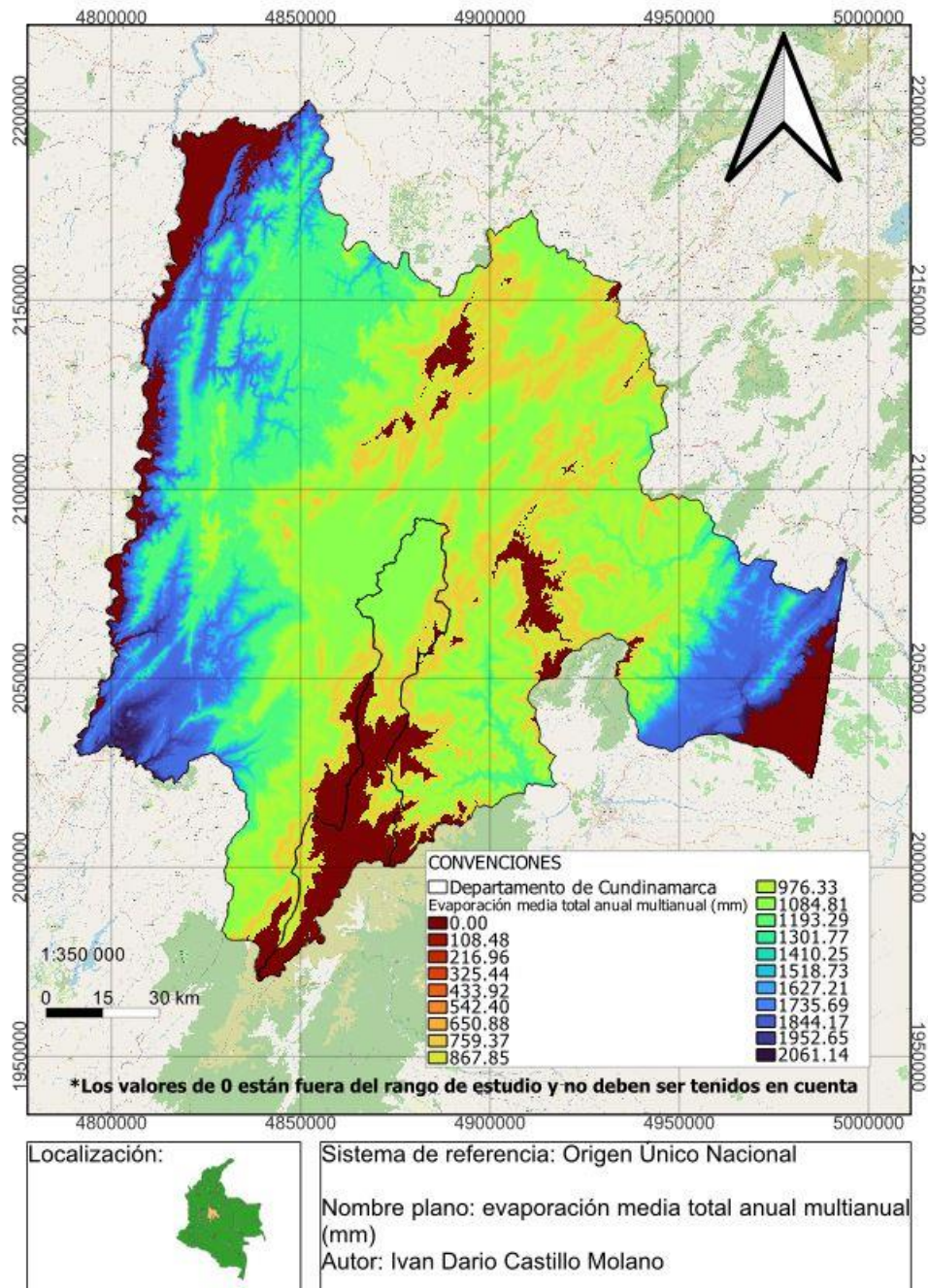


Figura 6-8 Mapa de evaporación media total anual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

La evaporación media total anual multianual máxima es 2.019,3 mm y la mínima 811,5 mm.

6.6.4 Coeficientes de relación

Para la elaboración de los mapas de los coeficientes, se evaluaron varios métodos de interpolación. La interpolación de vecinos naturales más cercanos (nearest neighbor) que utiliza información de puntos conocidos de una triangulación para calcular una media ponderada de las elevaciones de los adyacentes naturales al punto, tiene la restricción de que no extrapola los resultados, por lo que su aplicación es la que se encuentra dentro de los puntos con información (ver Figura 6-9).

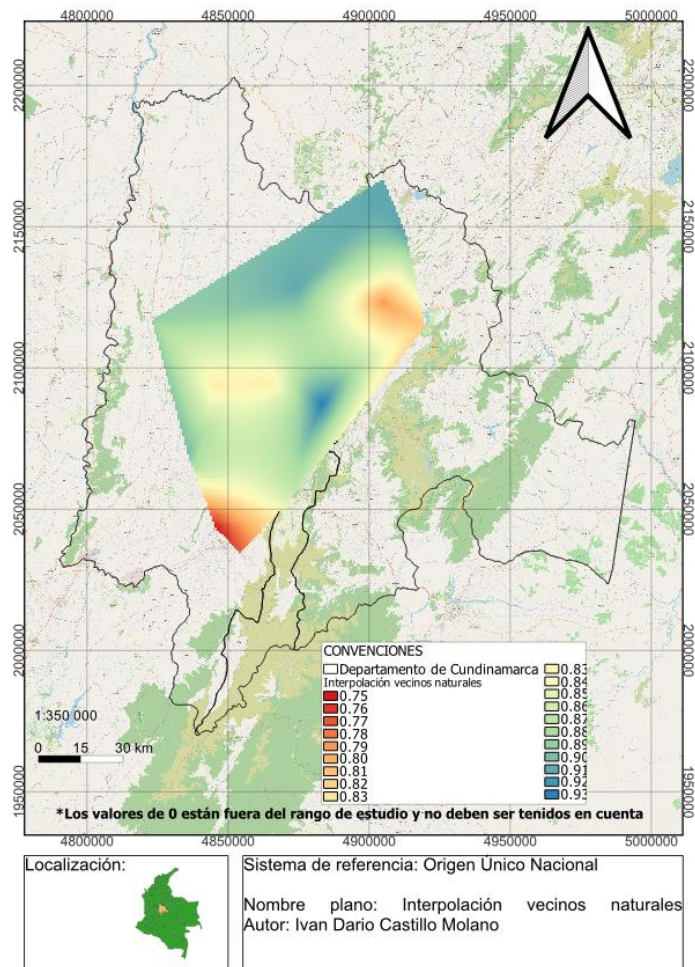


Figura 6-9 Interpolación por vecinos naturales más cercanos de los coeficientes a nivel anual

Fuente: Autor, 2023.

La interpolación spline utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función polinómica que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada. Aquí se presentan valores de coeficientes menores a 0,75 y mayores a 0,93 que representan el mínimo y máximo a nivel anual (ver Figura 6-10).

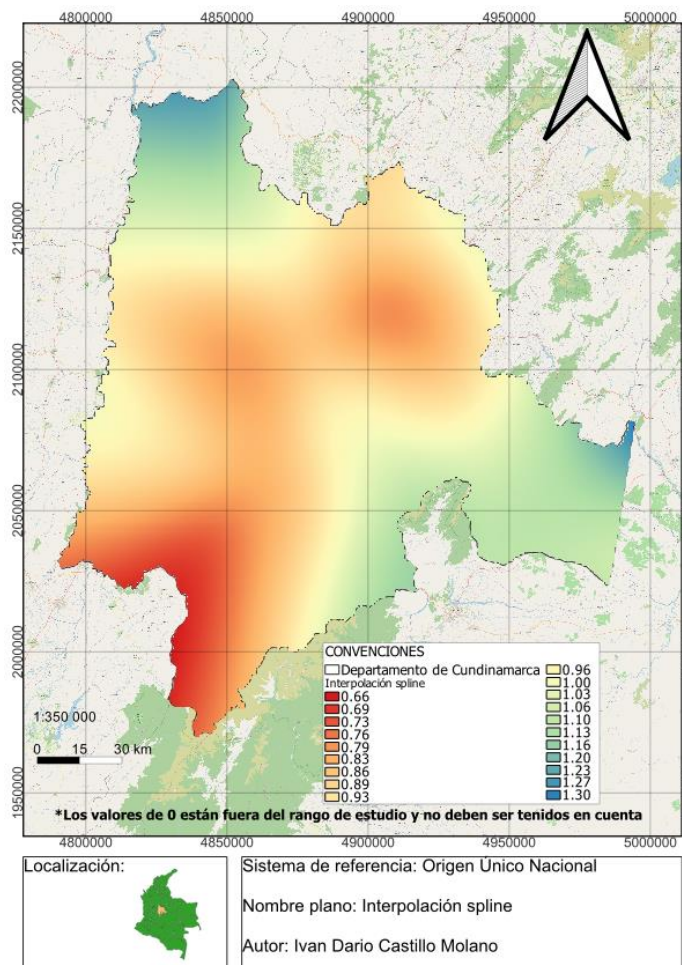


Figura 6-10 Interpolación spline de los coeficientes a nivel anual

Fuente: Autor, 2023.

La técnica trend (tendencia) interpola una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de tendencia. Al igual que con la interpolación spline, se presentan valores fuera del rango de coeficientes (ver Figura 6-11). Como la interpolación que mostro resultados más confiables en este estudio fue la IDW, es la que se utilizó para hacer los

mapas de los coeficientes. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los coeficientes alejados son extrapolaciones del método para garantizar la cobertura de todo el departamento, por lo tanto, pueden presentar un sesgo en especial para las zonas sin información (ver Figura 6-2).

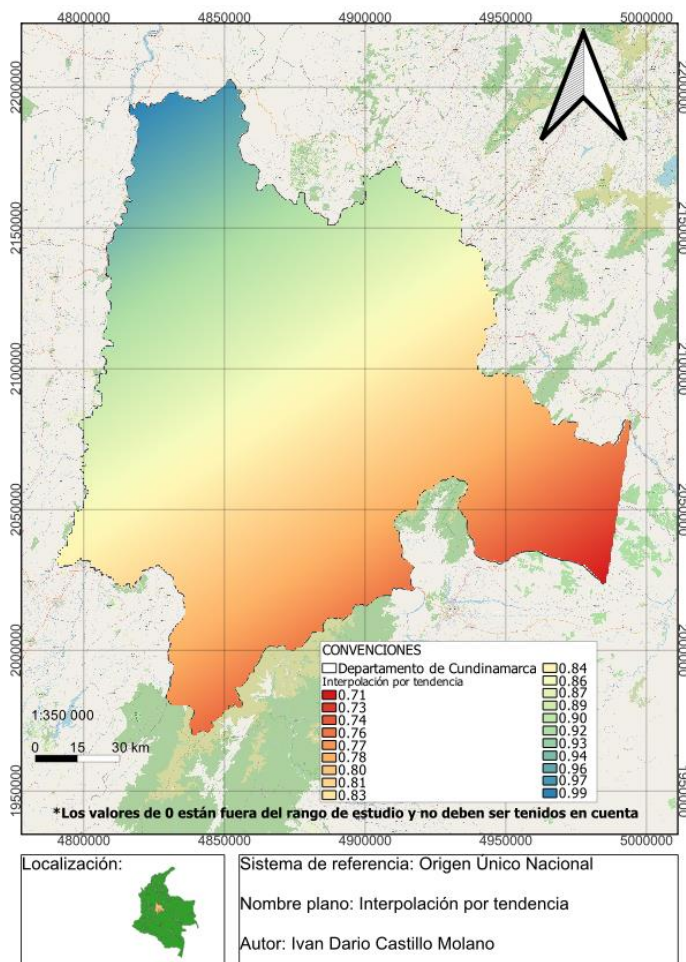


Figura 6-11 Interpolación por tendencia de los coeficientes a nivel anual

Fuente: Autor, 2023.

Con los resultados expuestos en el capítulo 6.5 y por medio de la interpolación IDW, se construyeron los mapas ráster a nivel mensual y anual. En la Figura 6-12 se aprecia que, a nivel mensual los coeficientes más bajos se encuentran en el sur de Cundinamarca.

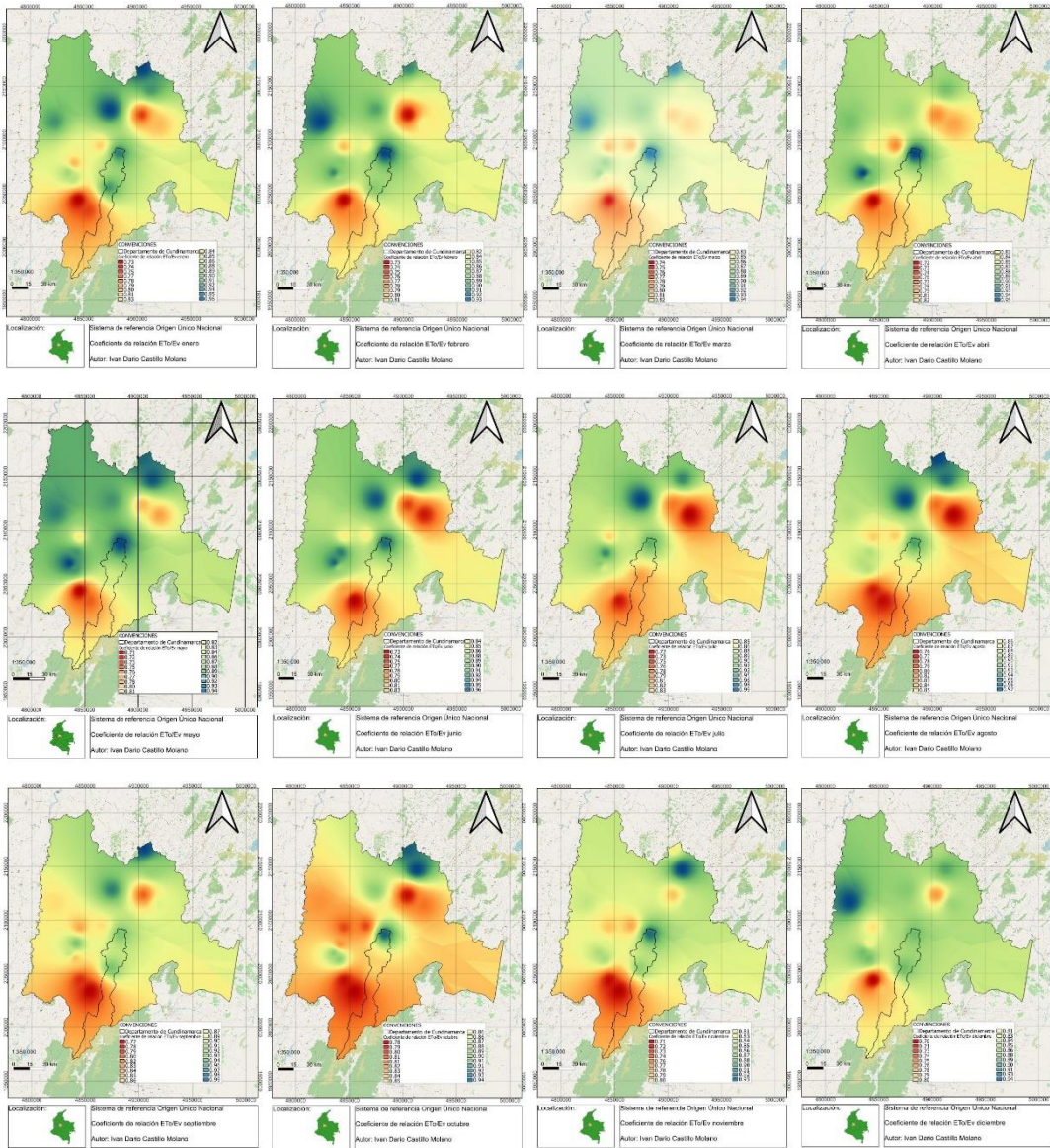


Figura 6-12 Mapa de coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ a nivel mensual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

La relación a nivel anual también presenta los coeficientes más bajos al sur del departamento y los valores más altos en el centro y al norte (ver Figura 6-13).

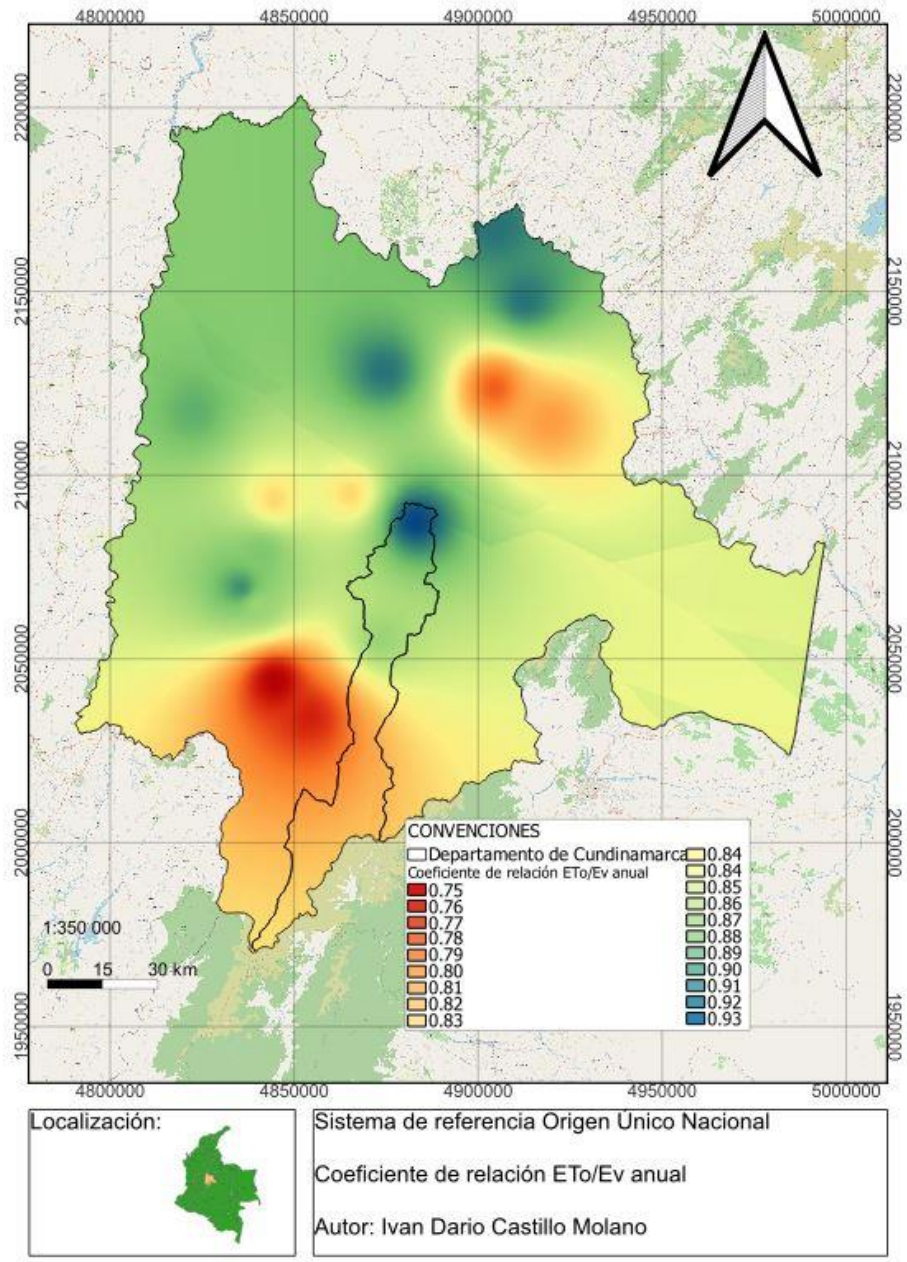


Figura 6-13 Mapa de coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ a nivel anual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

6.6.5 Evapotranspiración de referencia ETo

Los mapas se elaboran multiplicando los ráster de evaporación con los ráster de coeficientes, cumpliendo con el objetivo propuesto para este estudio. Los valores más altos de ETo mensual se encuentran al oriente y occidente del departamento (ver Figura 6-14).

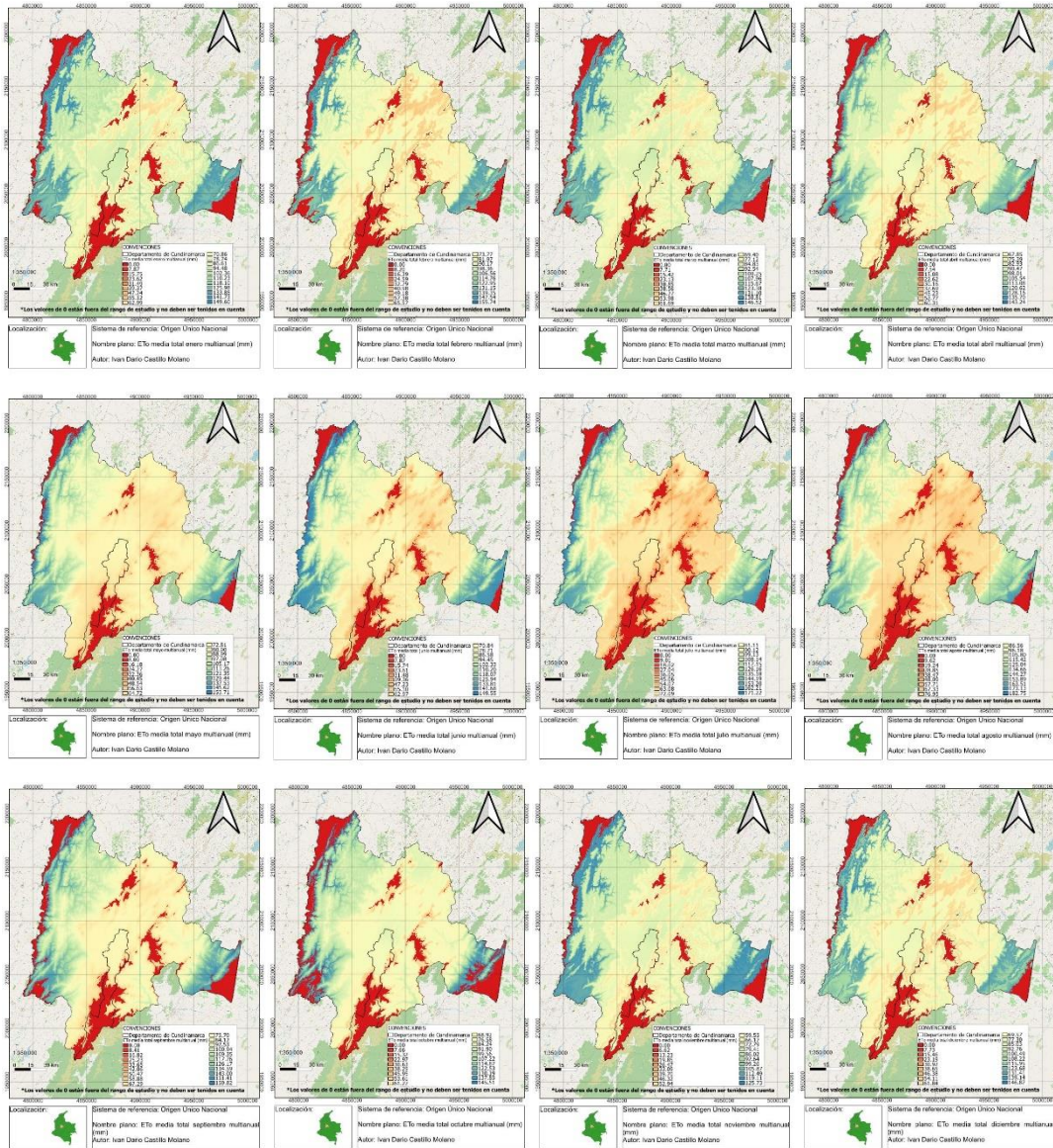


Figura 6-14 Mapas de ETo media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

Los valores más altos de ETo anual se encuentran al oriente y occidente del departamento (ver Figura 6-15).

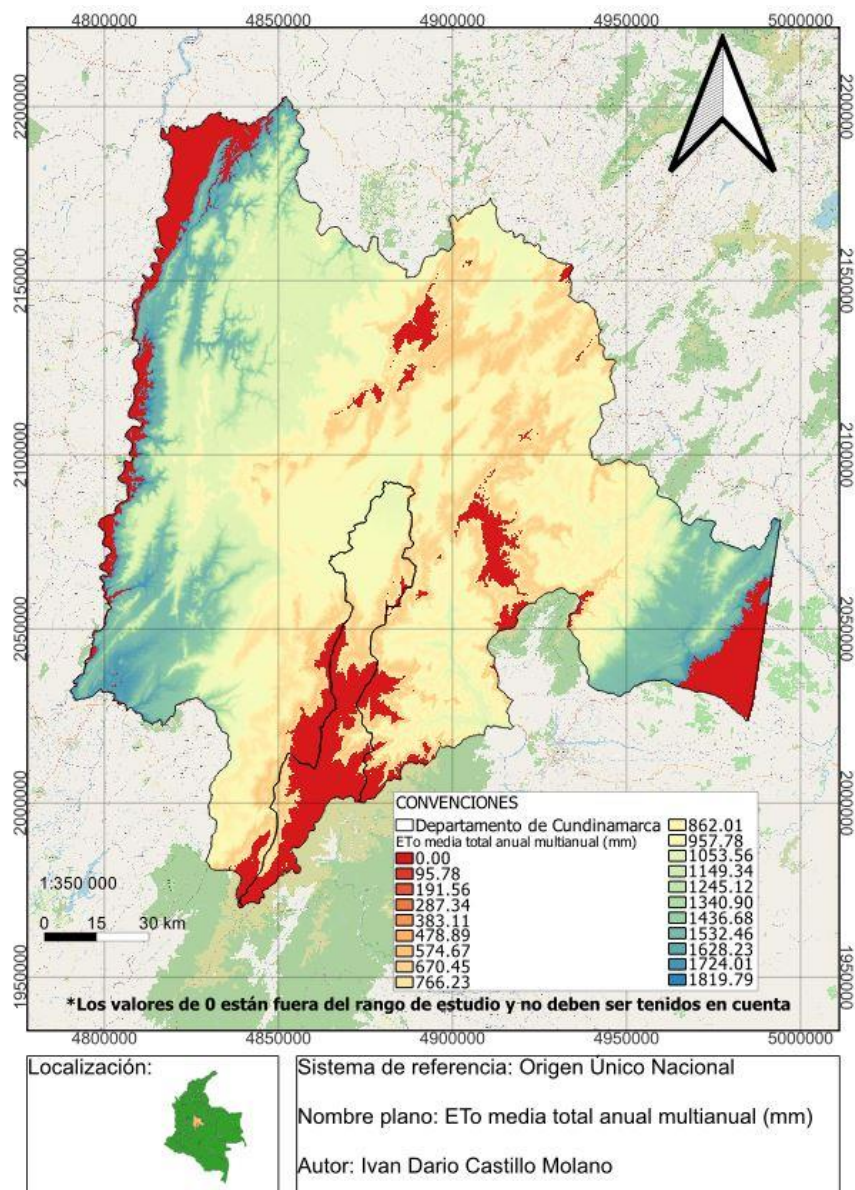


Figura 6-15 Mapas de ETo media total anual multianual para el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

Las memorias de los modelos de regresión de ajuste se encuentran en el anexo 7 y los mapas en el anexo 8.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Es posible regionalizar la ETo obtenida por el método de la FAO Penman-Monteith con los datos de evaporación de tanque clase A para el departamento de Cundinamarca, donde la relación en promedio a nivel anual multianual resultantes es de $E_{To}=0,86*E_v$. La metodología planteada en este estudio puede ser replicada a escala mensual y anual en el ámbito local, tanto en municipios como en otros departamentos de Colombia.

Los resultados demuestran que es posible construir modelos geoespaciales para las variables de temperatura, evaporación y ETo, para ello es necesario disponer de un MDT y de información climatológica.

La metodología aquí desarrollada se puede implementar en cualquier lugar de Colombia mientras haya la información que permita calcular la ETo en varias estaciones dentro del área de interés.

El tratamiento de la información climatológica para este tipo de proyectos es una labor dispendiosa y requiere de un análisis riguroso que permita establecer la calidad de la información.

Como los productos de este estudio representan condiciones climatológicas promedio, no se realiza un análisis de manera explícita del fenómeno ENSO (por sus siglas en inglés (El Niño Southern Oscillation)). Puede considerarse que este fenómeno se encuentra de forma implícita en los resultados.

La distribución de las estaciones en el departamento de Cundinamarca no es homogénea. La mayoría de estas se encuentran en el centro del departamento y apenas unas cuantas se ubican en el oriente y noroccidente de Cundinamarca.

Ninguna de las estaciones estudiadas tenía la totalidad de los registros, inclusive se tuvieron en cuenta, la que presentaron registros faltantes por encima del 30%, porque particularmente muchas de estas se ubicaban en zonas con escasa presencia de estaciones.

Hay menos información de evaporación que de temperatura. La evaporación fue la variable con la que se definió la temporalidad y la cantidad de estaciones de referencia, esto debido a que, comparada con la temperatura, se disponía de una cantidad menor de información.

Las series de evaporación totales mensuales crudas presentaban los valores de meses que a escala diaria estaban incompletos, razón por la cual se observaron datos mensuales muy por debajo del promedio.

Dependiendo de la información disponible, el intervalo de tiempo de los datos puede variar, pero en lo posible no debe ser menor a 10 años. En este proyecto el periodo de análisis se fijó entre el 01/01/1991 hasta 31/12/2013 abarcando 23 años o 8.401 días. Para este intervalo se encontró el mayor número de estaciones con el menor número de datos faltantes (porcentaje inferior al 30%).

El número de estaciones que registran al mismo tiempo evaporación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar es reducido y, en su mayoría tienen porcentajes altos de datos faltantes. A pesar de que, en el departamento de Cundinamarca se ubica un amplio número de estaciones meteorológicas, solo 18 de estas contenían los parámetros climáticos requeridos para el cálculo de la ETo.

Las series de velocidad del viento fueron la principal limitante respecto a la cantidad de estaciones seleccionadas para el cálculo de la ETo: había un número reducido de estaciones registradoras y muchas de estas tenían un alto porcentaje de datos faltantes.

En general, todas las series tenían un comportamiento homogéneo. Sin embargo, dentro de los registros de temperatura mínima de acuerdo con la prueba de Pettitt, la estación de Mesitas resultó no homogénea. Pero comparando el patrón estacional de esta respecto a la estación más cercana que es La Mesa, se observó que son muy parecidos por lo que se tomó la decisión de emplearla.

Se pueden elaborar los mapas a partir del MDT en formato ráster, con información mensual multianual e información anual multianual de estaciones con registros de temperatura y evaporación. Para esta labor se utilizaron 35 estaciones que registran en ambos casos temperatura y evaporación.

En el departamento de Cundinamarca, la dependencia de la temperatura media con respecto a la altura es lineal decreciente significativamente alta, con un coeficiente de correlación de 0,98.

La temperatura media y la evaporación se relacionan de manera no lineal, en la mayoría de los casos con funciones polinómicas simples de sexto orden en adelante. Esto significa que la evaporación aparte de la altitud y temperatura obedece a parámetros climáticos y cobertura vegetal locales.

La relación entre la evaporación y la ETo es proporcional y su comportamiento a lo largo del año a nivel mensual es prácticamente el mismo. Se evaluaron diversos análisis estadísticos de los parámetros climáticos para hallar la relación entre la evaporación y la ETo, sin embargo, solo se logró la estacionalidad y proporcionalidad no completando las series y eliminando los datos de evaporación que fueran menores a los valores mínimos calculados de ETo (el valor mínimo varía entre cada par de estaciones).

No todas las estaciones cumplieron la estacionalidad y proporcionalidad entre la evaporación y la ETo. Emparejando los valores medios totales mensuales multianuales de la evaporación y la ETo, 3 estaciones no cumplieron la relación proporcional, por lo que fueron descartadas del estudio: El Muña, Tabio y San Miguel de Sema.

Los valores de los coeficientes de relación k son altamente confiables en las zonas donde se localizan las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo. Aunque, como este coeficiente no se ve afectado por la localización o la altura y, depende netamente de la evaporación y la ETo, pueden esperarse resultados aceptables de ETo para las áreas sin estaciones.

Dependiendo a la resolución del MDT y el año de elaboración, puede haber cierta de incertidumbre en los resultados presentados, principalmente para las zonas con pendientes pronunciadas. A causa de la extensión del departamento de Cundinamarca se debieron descargar 26 imágenes las cuales fueron combinadas para obtener un único MDT.

La aplicabilidad del modelo de regionalización depende del rango de alturas en las que se encuentren las estaciones de estudio. En este caso, la estación con menos altura fue Aeropuerto Palanquero que tiene 172 msnm (límite inferior) y la estación más alta La Bolsa

con 3.195 msnm (límite superior). Las pruebas proporcionaron que para alturas fuera de este límite los resultados eran inconsistentes.

Los valores de 0 (cero) que se encuentran en los mapas generados, representan que esa zona se encuentra fuera del rango de estudio y no deben ser considerados en caso de que se haga uso de los ráster aquí presentados para un proyecto en el departamento de Cundinamarca.

A pesar de que existan estudios o bibliografía que sugieran coeficientes de relación entre la evaporación y la ETo, el coeficiente para el tanque evaporímetro de la zona donde se requiera calcular la ETo es específico para dicho lugar. Por ejemplo, de acuerdo con el documento de la FAO Riego y Drenaje 56 capítulo 4 cuadro 5, los coeficientes de tanque evaporímetro son 0,8, 0,7, 0,65 y 0,6 para una distancia del barbecho a barlovento de 1, 10, 100 y 1000 respectivamente. De esta tesis se obtuvo que el coeficiente de relación promedio para el departamento de Cundinamarca es de 0,86, lo que significa que está por encima de los valores estipulados en el documento de la FAO.

De acuerdo con el modelo geoespacial, en el departamento de Cundinamarca los meses con mayor ETo son julio y agosto, por lo que es de esperarse que para ese periodo existan los mayores requerimientos hídricos de los cultivos y, por lo tanto, se necesite un volumen de agua de riego más grande respecto a los otros meses del año.

7.2 Recomendaciones

Si es posible, contrastar los valores de ETo obtenidos por el método de la FAO Penman Monteith con los registros de un lisímetro que se encuentre en el lugar de interés o próximo a este. Comparar los valores teóricos con los registros en campo le dará mayor robustez y confiabilidad al estudio.

Aunque los resultados se presentan a escala mensual y anual, es necesario contrastar con las series diarias de las variables climáticas requeridas, especialmente con la evaporación del tanque clase A. Esto se debe a que en este estudio se hallaron estaciones que tenían datos faltantes a nivel diario y que no fueron completados al momento de totalizar las series mensuales, presentando valores menores que distorsionan el comportamiento de este parámetro climático.

Abarcar un intervalo de tiempo lo más extenso posible con el menor porcentaje de datos faltantes, para que los resultados de los modelos geoespaciales sean significativamente representativos en la zona de estudio. Se debería incorporar un análisis gráfico, estadístico y geográfico para la toma de esta decisión.

La localización de las estaciones tiene un peso especialmente relevante para la creación del modelo geoespacial y en lo posible se deben seleccionar de tal manera que la densidad de distribución abarque toda el área de estudio.

En caso de que no se encuentre una relación proporcional entre la evaporación y la ETo, se sugiere no completar la información faltante y eliminar los valores de evaporación que sean menores a los mínimos de ETo.

Es importante tener en cuenta que cuando se decide trabajar con series no homogéneas o incompletas, se podría introducir limitaciones y sesgos dentro de los resultados.

Para generar unos resultados más precisos con los modelos geoespaciales construidos, se requiere la mayor cantidad posible de estaciones.

El modelo de regionalización solo se puede emplear dentro del rango de alturas en las que se encuentren las estaciones seleccionadas para el estudio.

8 Bibliografía

Allen, R. Pereira, L. Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia. Estudio FAO Riego y Drenaje 56.

Andrades, J. Torres, H. López, J. & Rojas, M. (2019). Análisis espacio temporal de la homogeneidad de estaciones de precipitación en una zona árida y semiárida del Centro Occidente de Venezuela Ciencia e Ingeniería, vol. 40, núm. 2, pp. 185-194, Universidad de los Andes, Venezuela. Recuperado de [https://www.redalyc.org/journal/5075/507567825009/html/#:~:text=La%20homogeneidad%20de%20una%20serie,del%20tiempo%20\(Zaid%202010\).](https://www.redalyc.org/journal/5075/507567825009/html/#:~:text=La%20homogeneidad%20de%20una%20serie,del%20tiempo%20(Zaid%202010).) el 19 de noviembre de 2023.

Barón, A. (2003). Modelos geoespaciales de la distribución de las variables climatológicas en el territorio colombiano. Meteorología Colombiana, pp. 81-89. ISSN 0124-6984. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://docplayer.es/5418969-Modelos-geoespaciales-de-la-distribucion-de-las-variables-climatologicas-en-el-territorio-colombiano.html> el 21 de febrero de 2023.

Barrios, A. (2013). Tema 3: Evaporación, transpiración y evapotranspiración. Universidad de Los Andes, Venezuela. Recuperado de <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/SEMESTRE%20A2013/Tema%203%20Evaporacion.pdf> el 10 de julio de 2023.

Doorenbos, J. Kassan, A. (1979). Yield response to water. FAO irrigation and Drainage, Paper 33. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/284800975_Yield_response_to_water_Irrigation_and_Drainage/link/5f538496458515e96d2f1c8b/download el 27 de septiembre de 2023.

Doorenbos, J. Pruitt, W. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper. Roma, FAO. Recuperado de <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2015/08/LIVRO-385-Doorenbos-e-Pruitt-Guidelines-for-predicting-crop-water-requirements.pdf> el 27 de septiembre de 2023.

Guajardo, R. Granados, G. Sánchez, I. Díaz, G. & Barbosa, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y ciencias del agua*, pp. 157-177. Epub 30 de julio de 2021. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222017000500157#B18 el 17 de noviembre de 2023.

Gobernación de Cundinamarca. (2020). Plan departamental de desarrollo 2020-2024 Cundinamarca ¡Región que progresa! Recuperado de <http://cundinet.cundinamarca.gov.co/portal/planeacion/documentos/plan-de-desarrollo-interactivo.pdf> el 26 de julio de 2023.

IDEAM, INVEMAR. (2017). Protocolo de monitoreo de agua. Bogotá, Colombia.

IDEAM. (2018). Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET_o) para Colombia. IDEAM-METEO/002-2018. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Evapotranspiracion+de+Referencia+ETo+para+Colombia.pdf/12700c18-c492-40cc-8971-46f48f144824>. el 25 de julio de 2023.

Jaramillo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*, pp. 288-298. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n31/n31a11.pdf> el 1 de agosto de 2023.

Kang, H. M., & Yusof, F. (2012). Homogeneity Tests on Daily Rainfall Series in Peninsular Malaysia, pp. 9–22. Recuperado de <http://m-hikari.com/ijcms/ijcms-2012/1-4-2012/kangIJCMS1-4-2012.pdf> el 18 de noviembre de 2023.

Lavado, W. Lhomme, J. Labat, D. Guyot, J. Gilles, B. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO-56 Penman-Monteith) con limitados datos climáticos en la cuenca andina amazónica peruana. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*, pp. 31-43. Recuperado de: https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper3.pdf. el 1 de agosto de 2023.

López, J. Díaz, T. Watts, C. Rodríguez, J. Castellanos A. Partida, L. Velázquez, T. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el valle de Culiacán, México. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 209-219. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57341186003> el 3 de agosto de 2023.

López, M. (2011). Análisis de los métodos de estimación de evaporación y evapotranspiración a las condiciones locales de la ciudad de Córdoba (tesis de maestría). Maestría en Ciencias Hídricas. Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. Recuperado de <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/803> el 4 de agosto de 2023.

López-Torrijos, F. Zea, J. (2021). Análisis de anomalías con R. R Pubs by R Studio. Recuperado de <https://rpubs.com/silvosus/773222> el 18 de noviembre de 2018.

Lumivero (2023). XLSTAT statistical and data analysis solution. New York, USA. <https://www.xlstat.com/es>

Monsalve, G. (2014). Hidrología en la ingeniería. (pp. 151-173). Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Ocampo, A. (2019). Evaluación de no estacionaridad de series de tiempo hidroclimatológicas en Colombia: Caso aplicado al Eje Cafetero (tesis de grado). Ingeniería ambiental. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/fa23f898-b73d-404a-9c39-5ec2c608d87b/content> el 18 de noviembre de 2023.

OMM. (2020). Guía de Prácticas Hidrológicas. Volumen I Hidrología - de la medición a la información hidrológica. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial, OMM-N°168.

Ortiz, R. Tamayo, C. Chile, M. Méndez, Andrés. (2018). Coeficiente del tanque evaporímetro Clase A para estimar la evapotranspiración de referencia para el valle de Tumbaco. Siembra, vol. 5, núm. 1, 2018. Universidad Central del Ecuador, Ecuador. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/6538/653868369002/653868369002.pdf> el 25 de septiembre de 2023.

Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), pp. 126-135. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/2346729?read-now=1&seq=1#page_scan_tab_contents el 19 de noviembre de 2023.

QGIS. (2020). Guía/Manual de usuario (QGIS 3.10). Análisis ráster. QGIS Project. Recuperado de https://docs.qgis.org/3.10/es/docs/user_manual/working_with_raster/raster_analysis.html el 21 de noviembre de 2023.

QGIS. (2023). Guía/Manual de usuario (QGIS 3.10). Distancia inversa ponderada (IDW). QGIS Project. Recuperado de https://docs.qgis.org/3.28/es/docs/gentle_qgis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html el 21 de noviembre de 2023.

Remeneiras G. (1974). Tratado de Hidrología Aplicada. (pp. 273-300). Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona, España.

Sánchez, J. (2002). Hidrología superficial y subterránea. Evapotranspiración. Universidad de Salamanca. Recuperado de <https://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf> el 17 de julio de 2023.

Sánchez, M. Carvacho, L. (2011). 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, pp. 171-186. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000300010> el 4 de agosto de 2023.

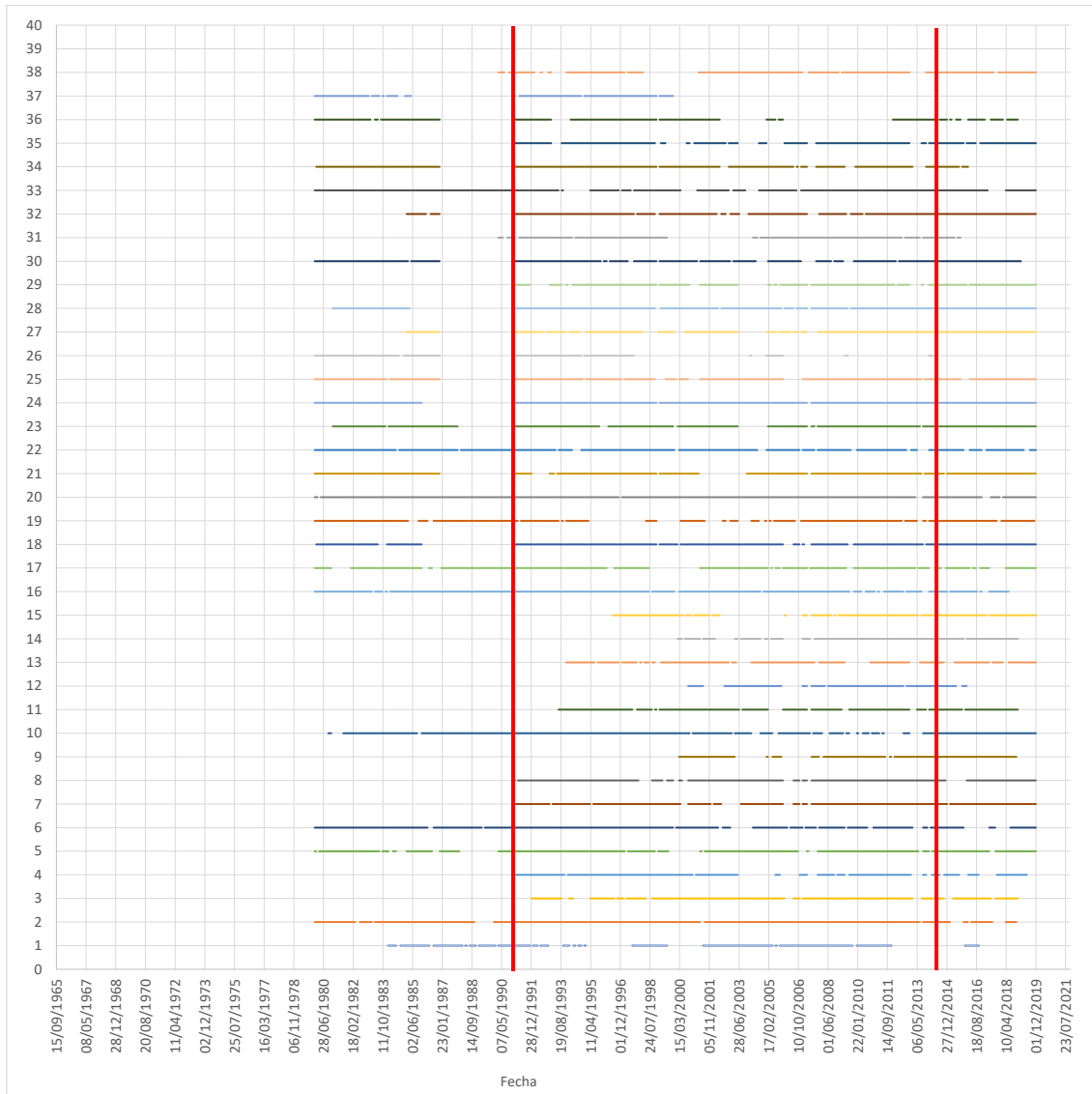
Strang, G. Herman, E. (2022). Cálculo volumen 1. 6.8 Crecimiento y decaimiento exponencial. OpenStax. Houston, Texas. Recuperado de <https://openstax.org/books/c%C3%A1culo-volumen-1/pages/6-8-crecimiento-y-decaimiento-exponencial> el 20 de noviembre de 2023.

Triola, M. (2009). Estadística. (pp. 74-135). Décima edición, Pearson Educación, México.

Walpole, R. Myers, R. Myers, S. Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Novena edición. Pearson educación, México. ISBN: 978-607-32-1417-9.

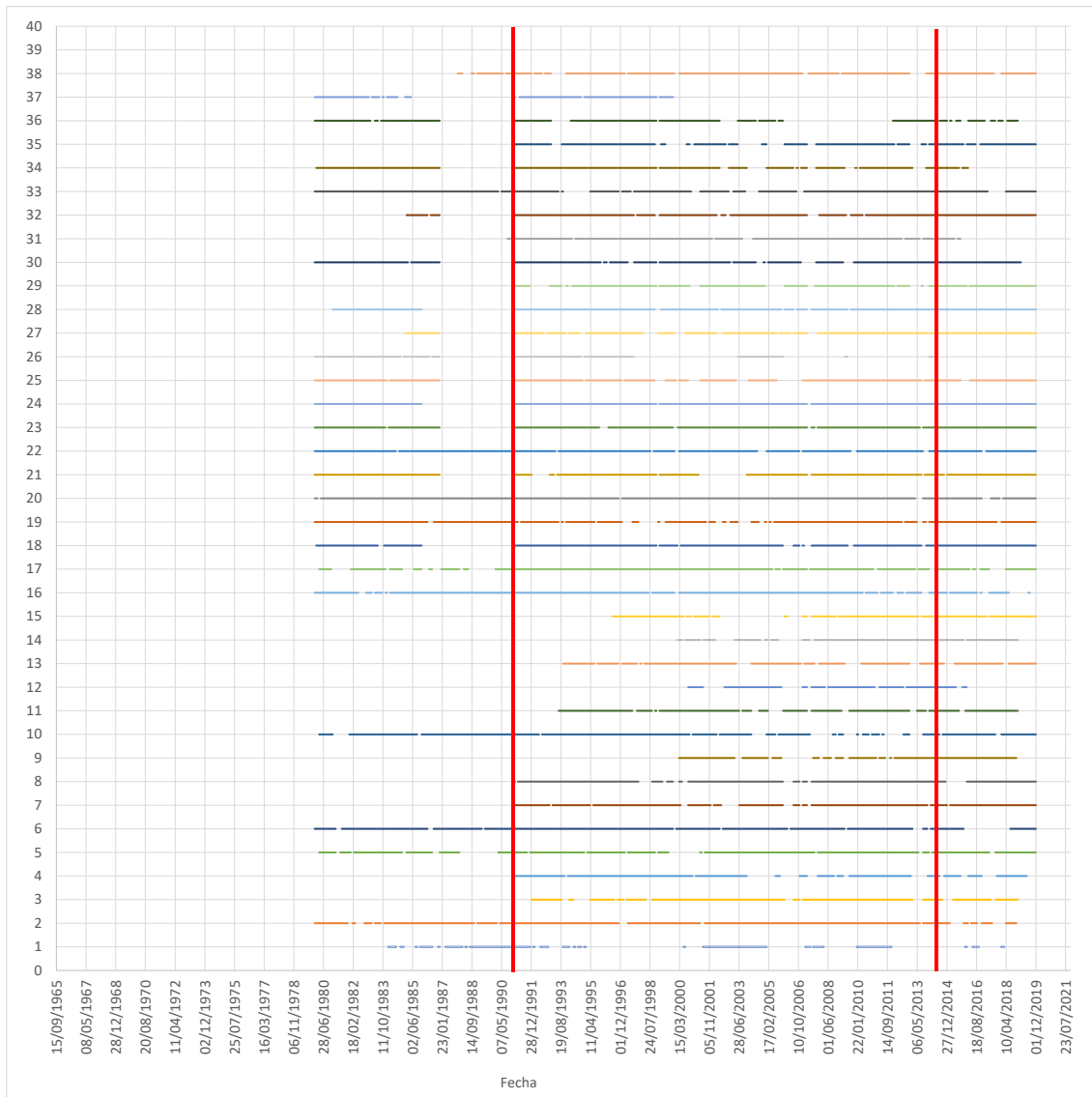
9 Anexos

9.1 Anexo 1. Información de las series climatológicas



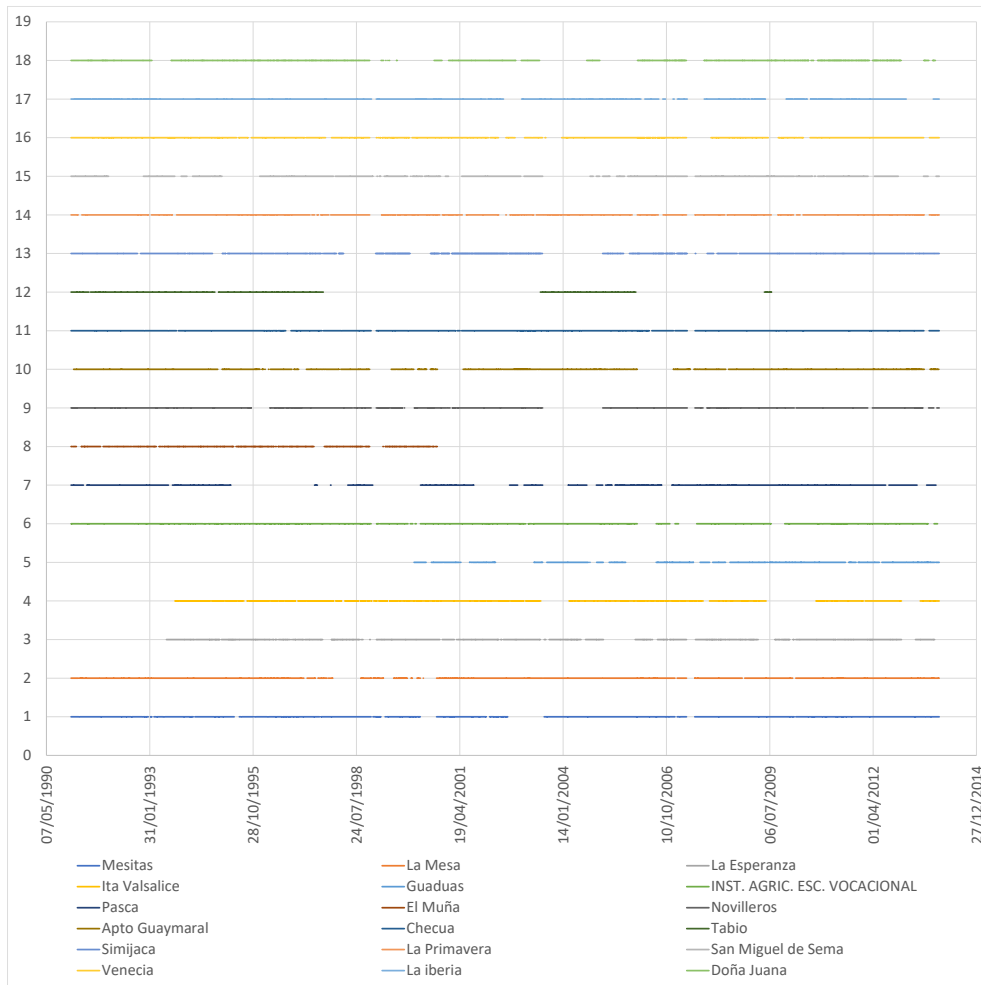
Gráfica 9-1 Temporalidad de los registros mensuales de temperatura máxima

Fuente: Autor, 2023.



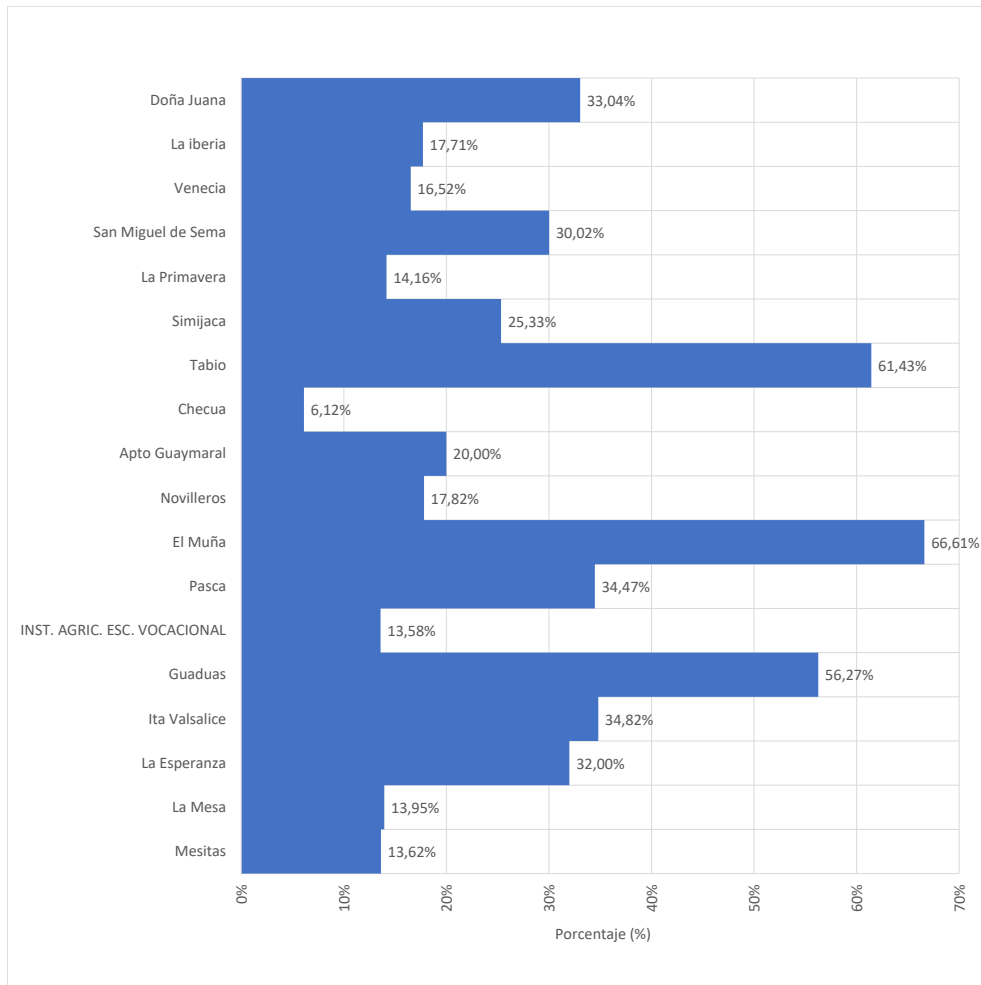
Gráfica 9-2 Temporalidad de los registros mensuales de temperatura mínima

Fuente: Autor, 2023.



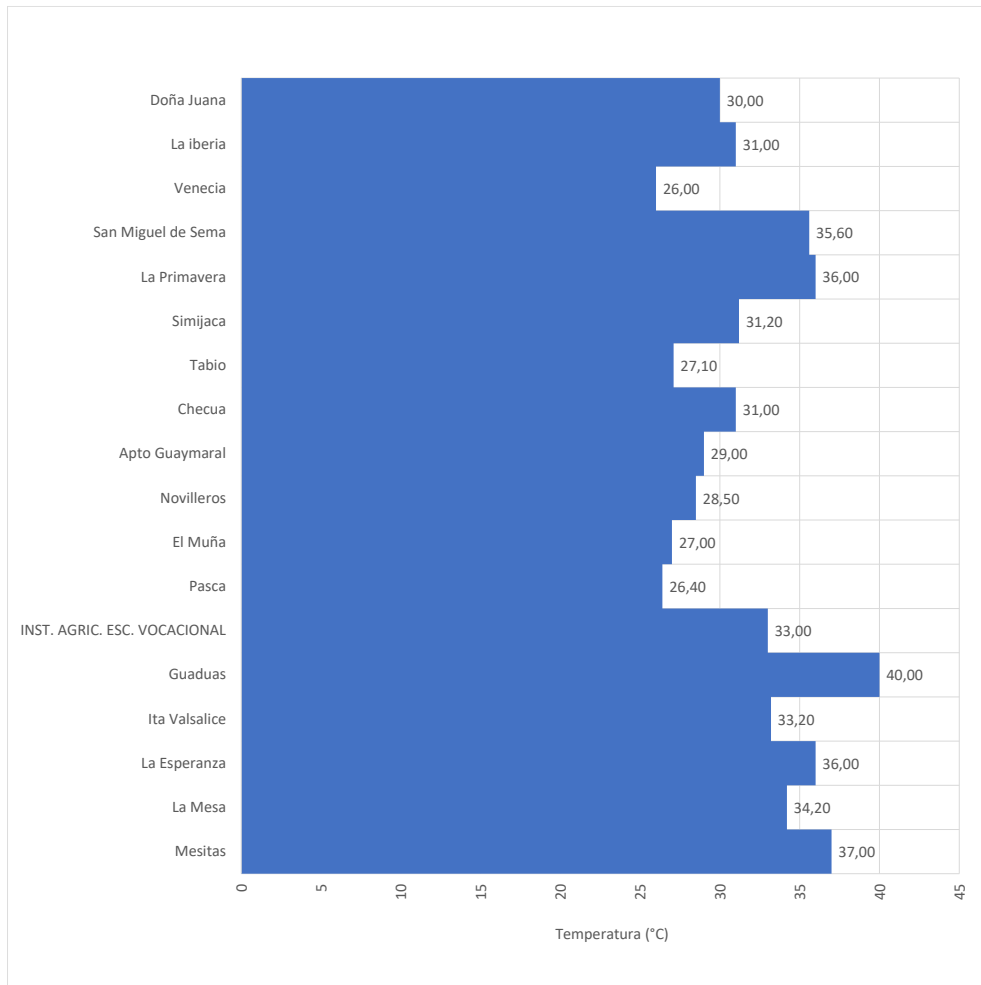
Gráfica 9-3 Temporalidad de los registros de temperatura máxima empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



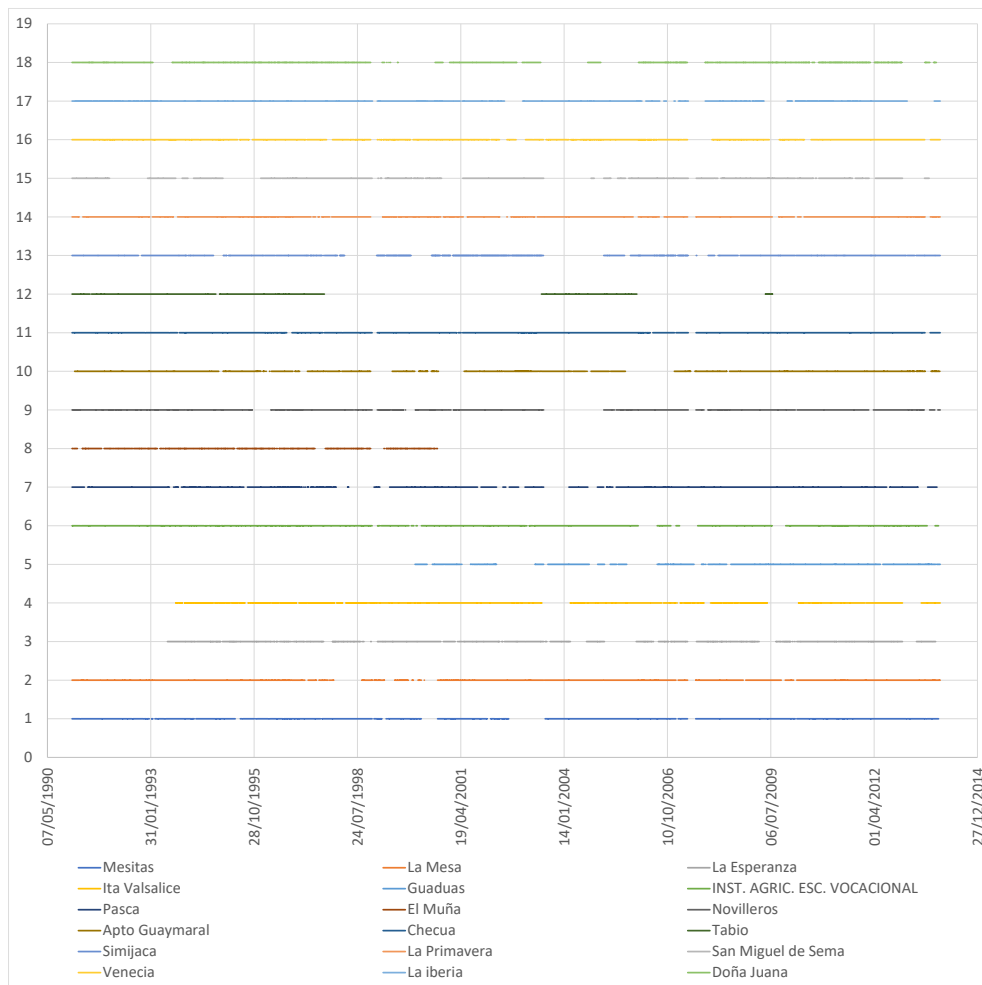
Gráfica 9-4 Porcentaje de datos faltantes de temperatura máxima empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



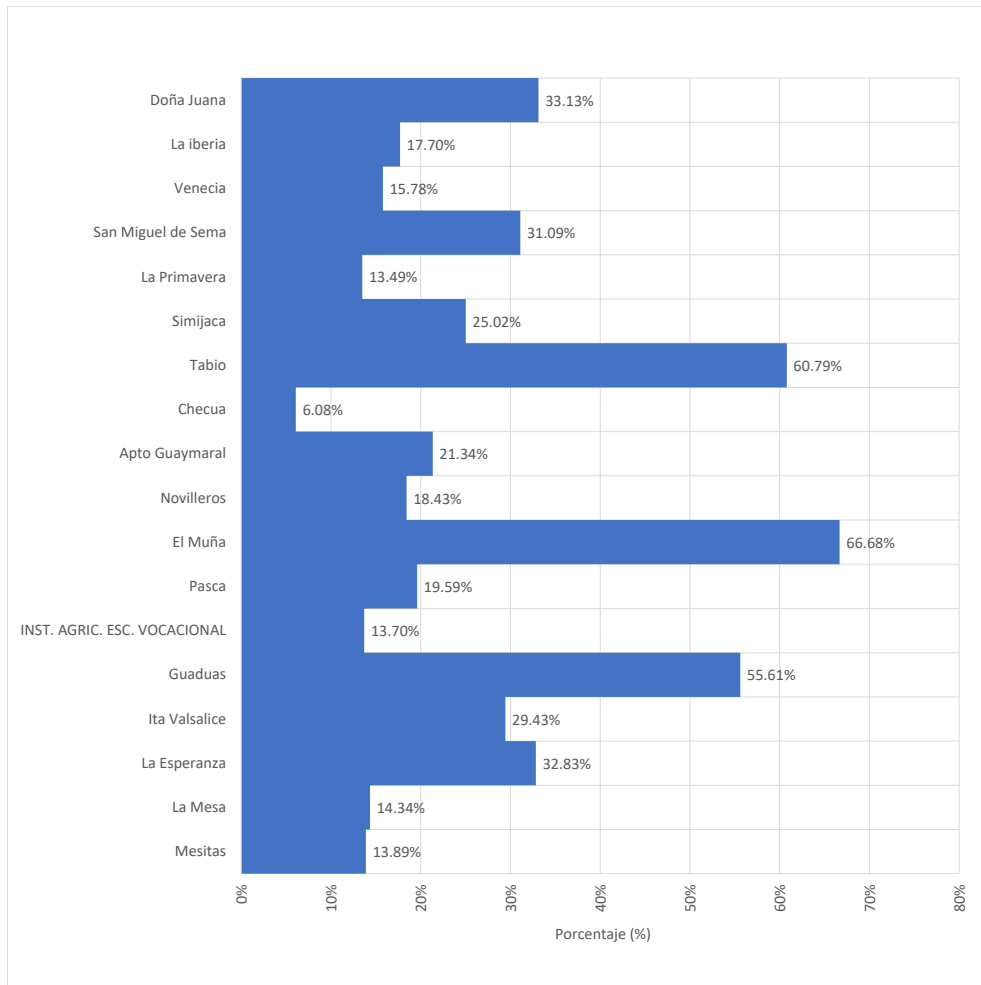
Gráfica 9-5 Temperatura máxima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



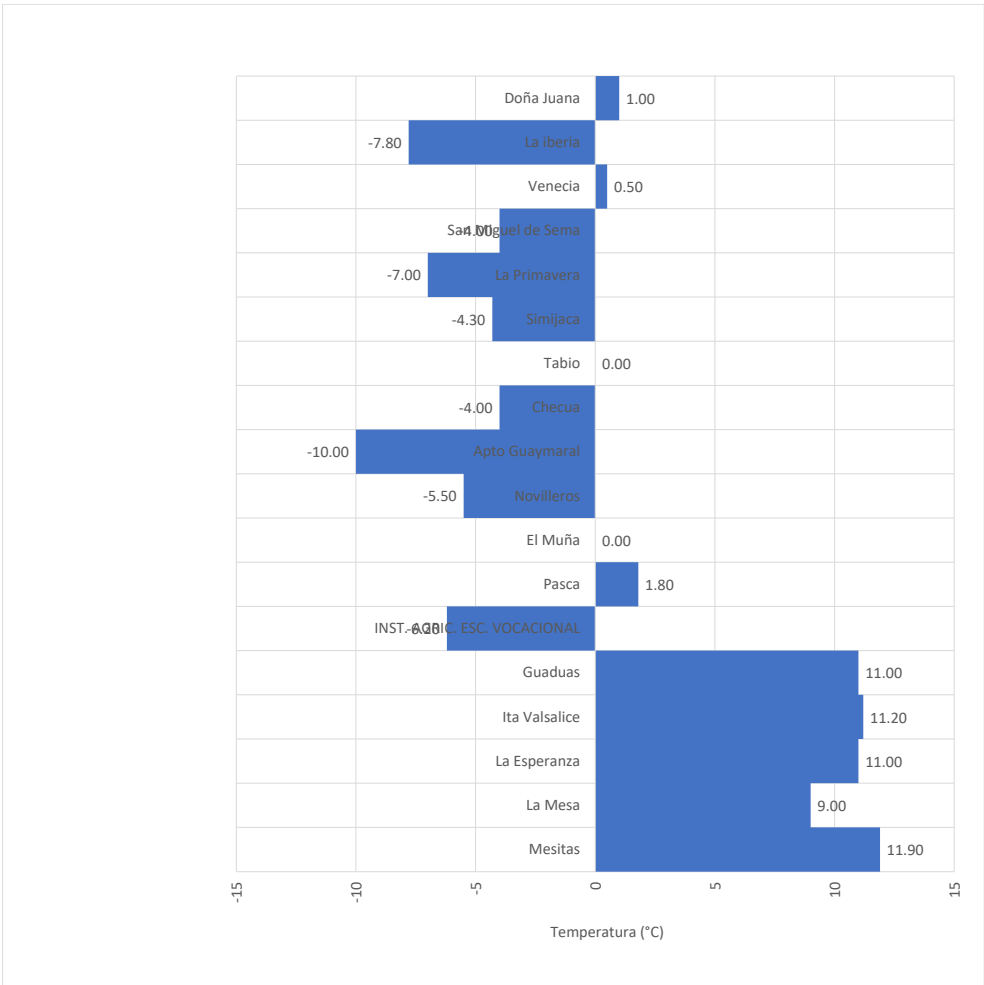
Gráfica 9-6 Temporalidad de los registros de temperatura mínima empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



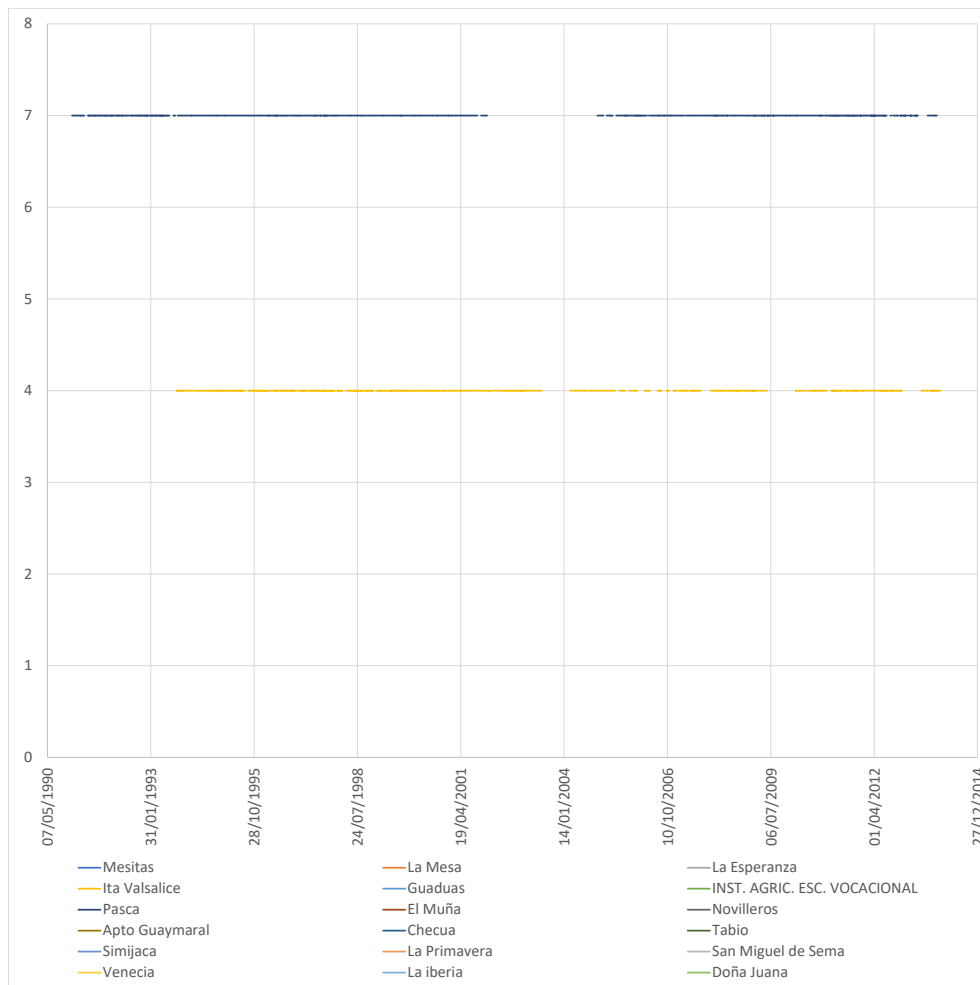
Gráfica 9-7 Porcentaje de datos faltantes de temperatura mínima empleados para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



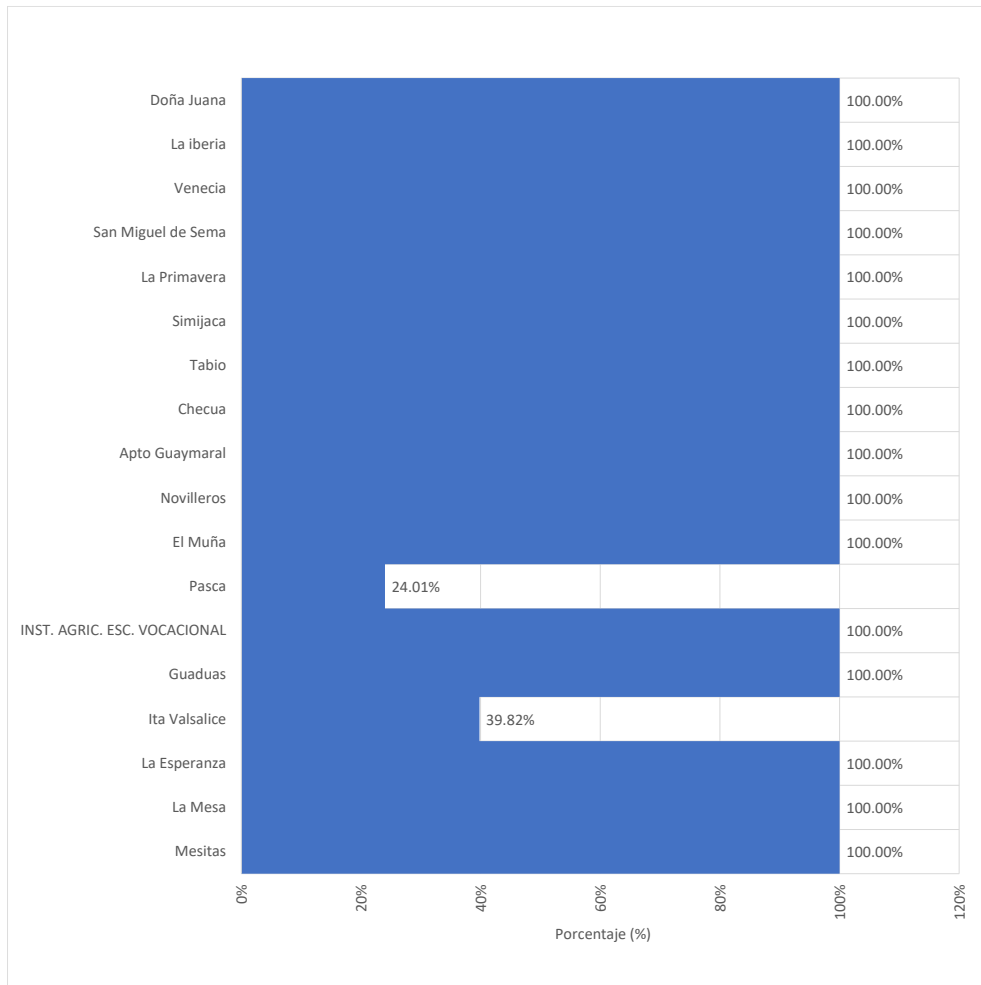
Gráfica 9-8 Temperatura mínima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



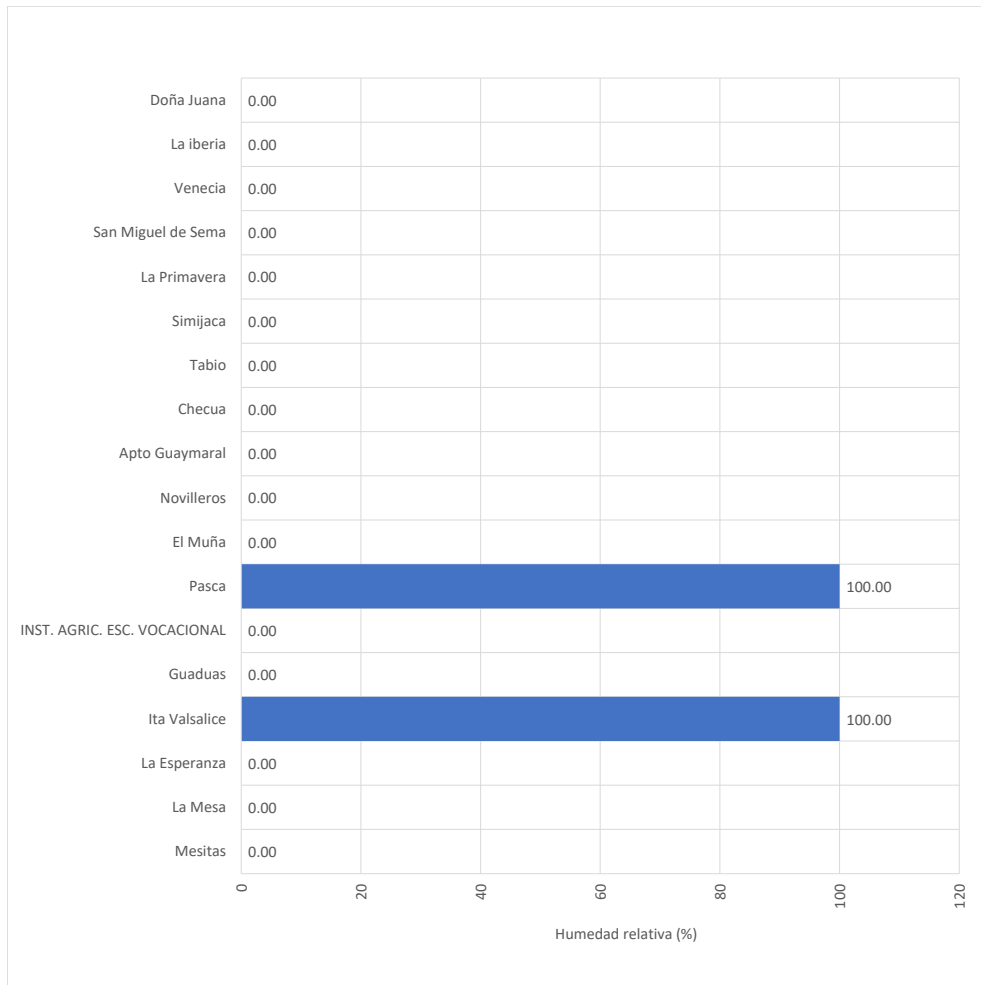
Gráfica 9-9 Temporalidad de los registros de humedad relativa máxima empleados para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



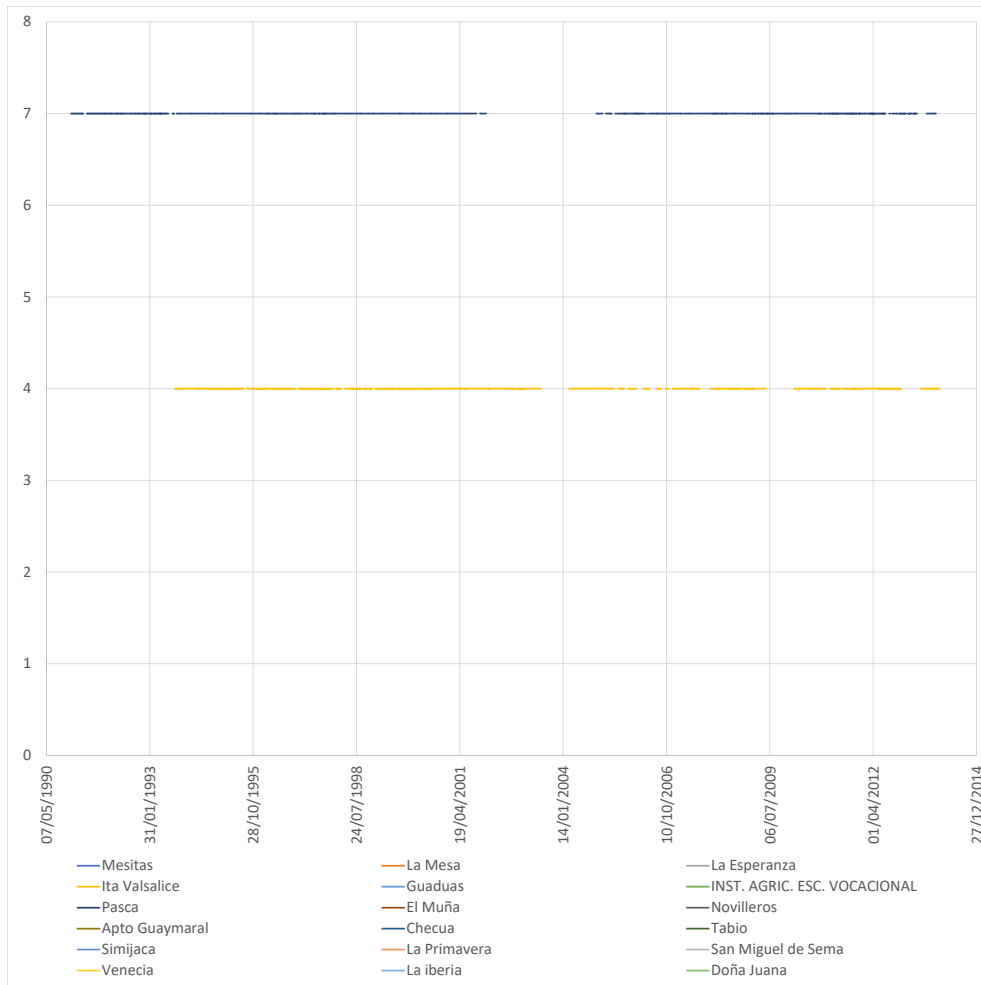
Gráfica 9-10 Porcentaje de datos faltantes de humedad relativa máxima empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



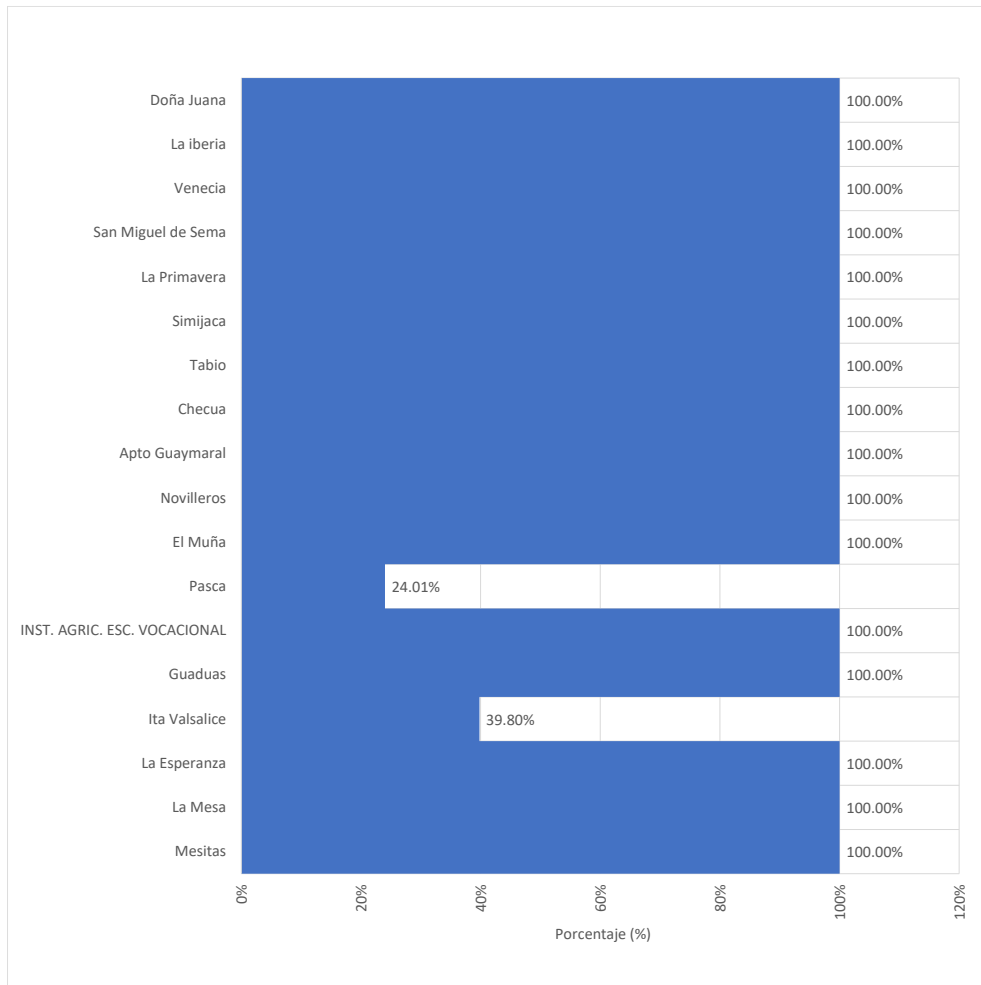
Gráfica 9-11 Humedad relativa máxima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



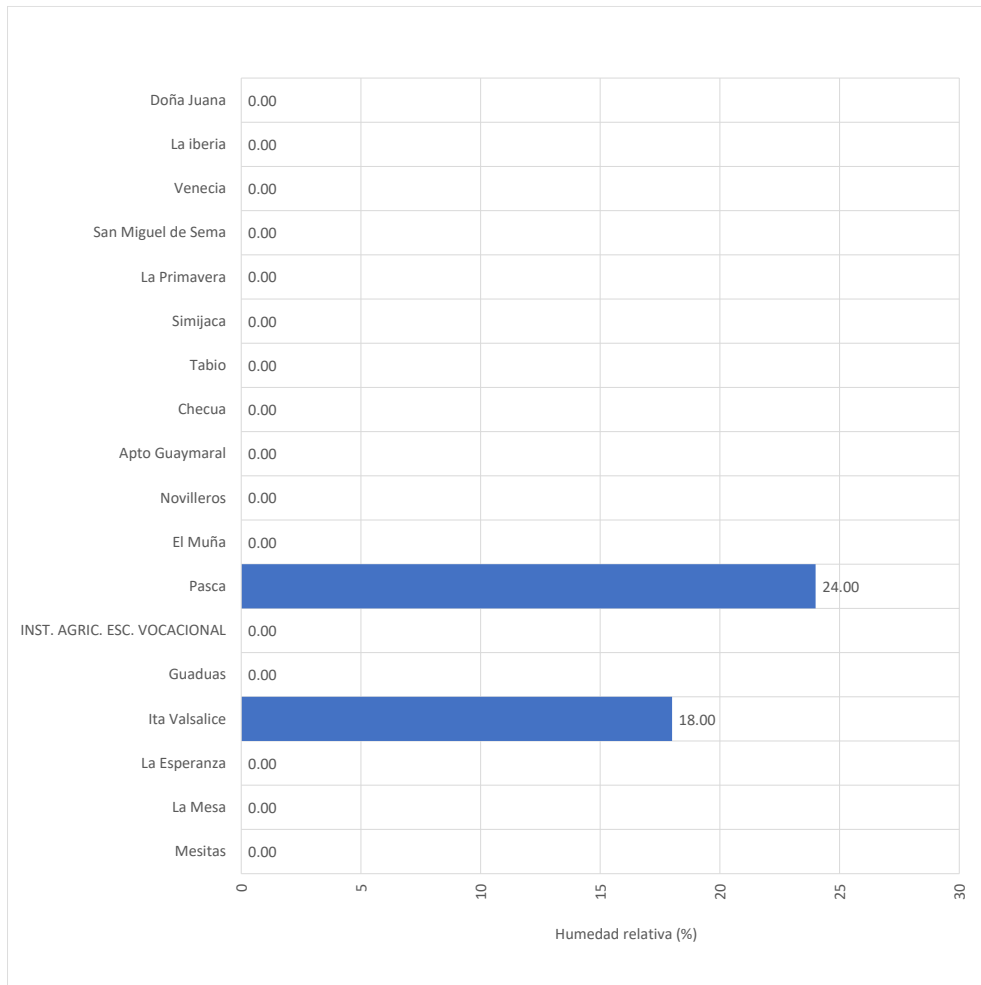
Gráfica 9-12 Temporalidad de los registros de humedad relativa mínima empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



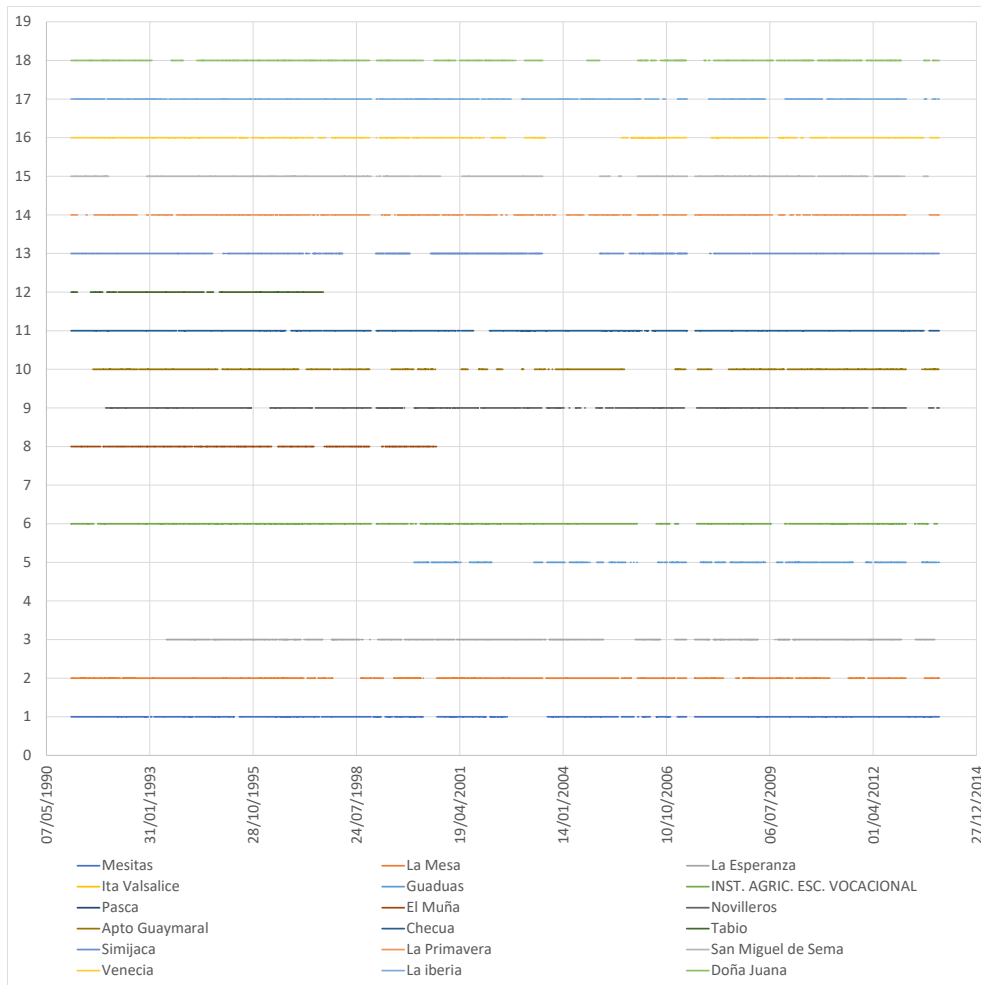
Gráfica 9-13 Porcentaje de datos faltantes de humedad relativa mínima empleados para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



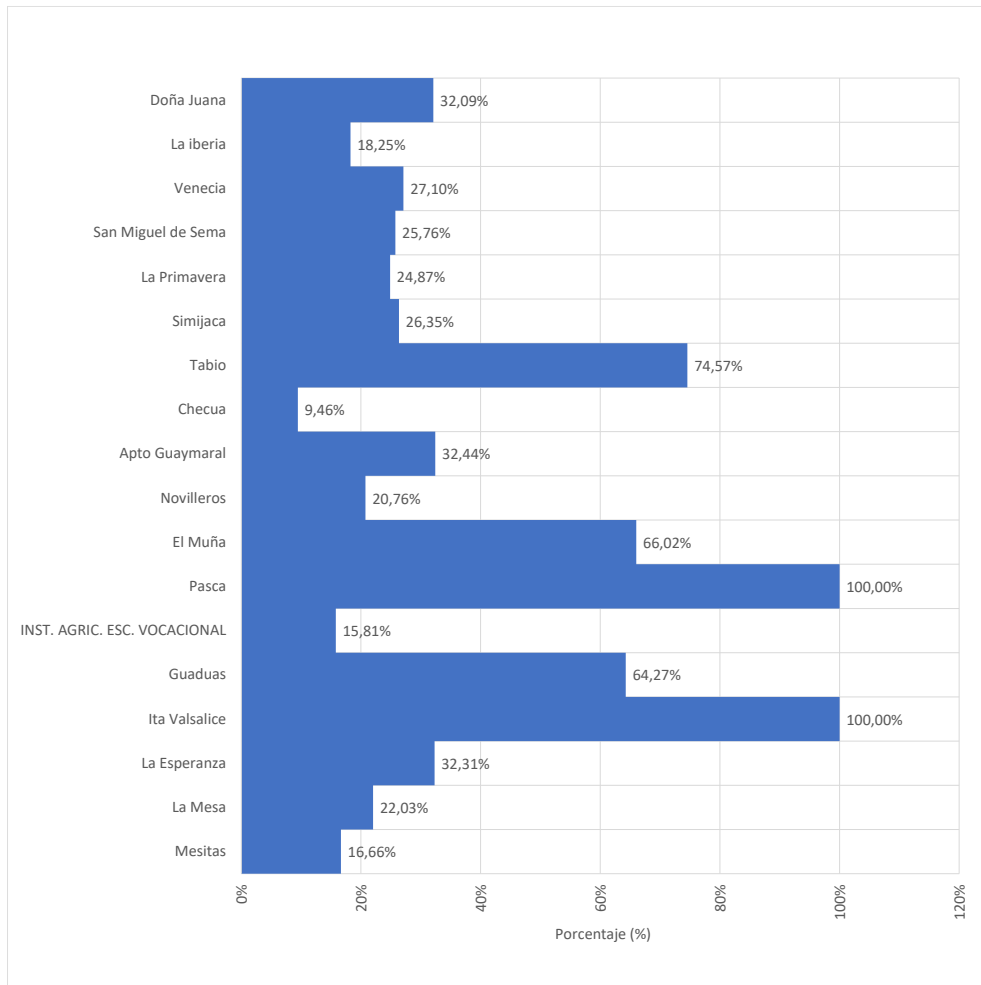
Gráfica 9-14 Humedad relativa mínima registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



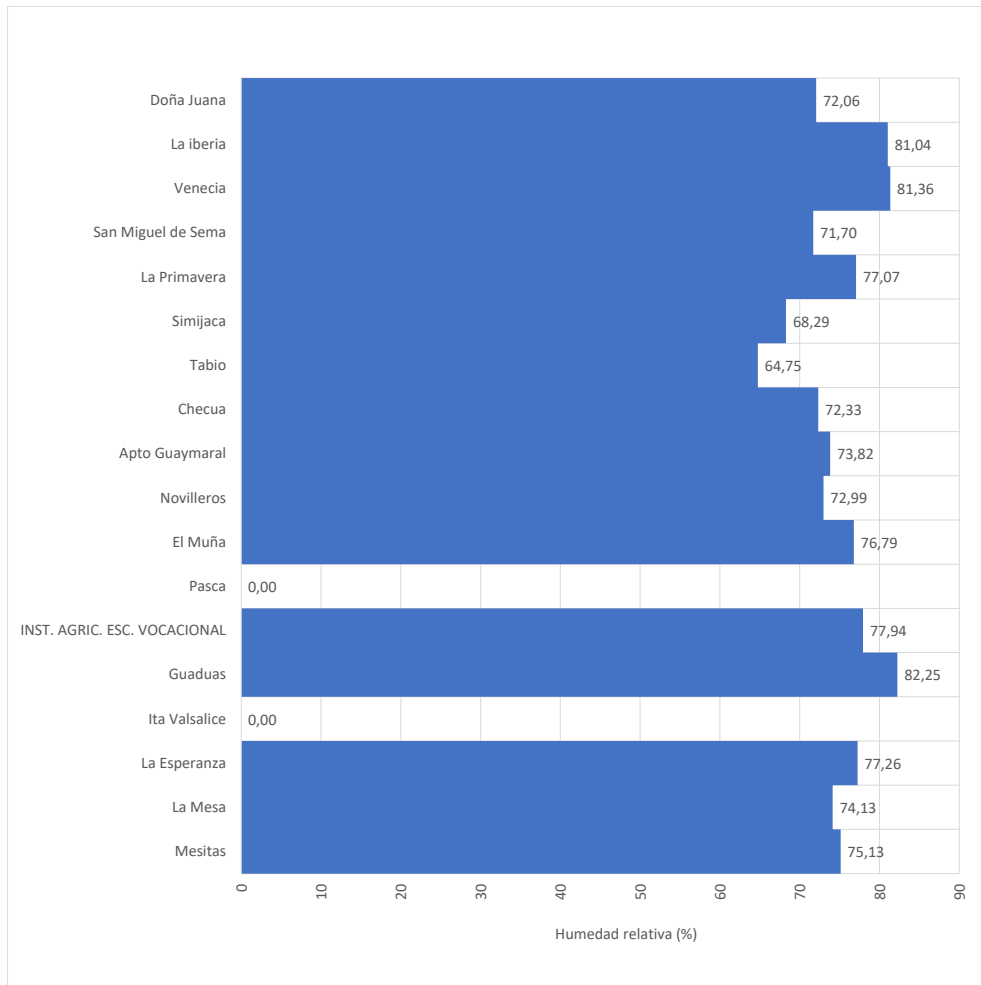
Gráfica 9-15 Temporalidad de los registros de humedad relativa media empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



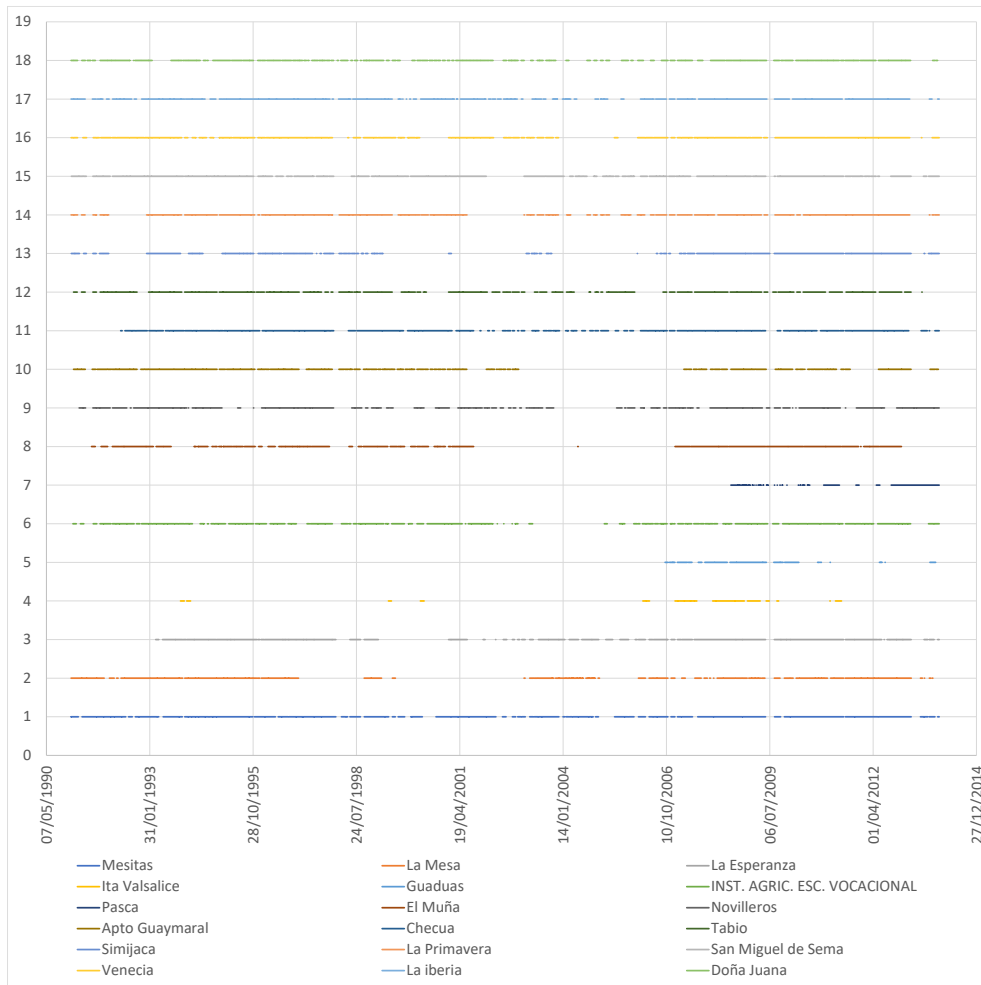
Gráfica 9-16 Porcentaje de datos faltantes de humedad relativa media empleados para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



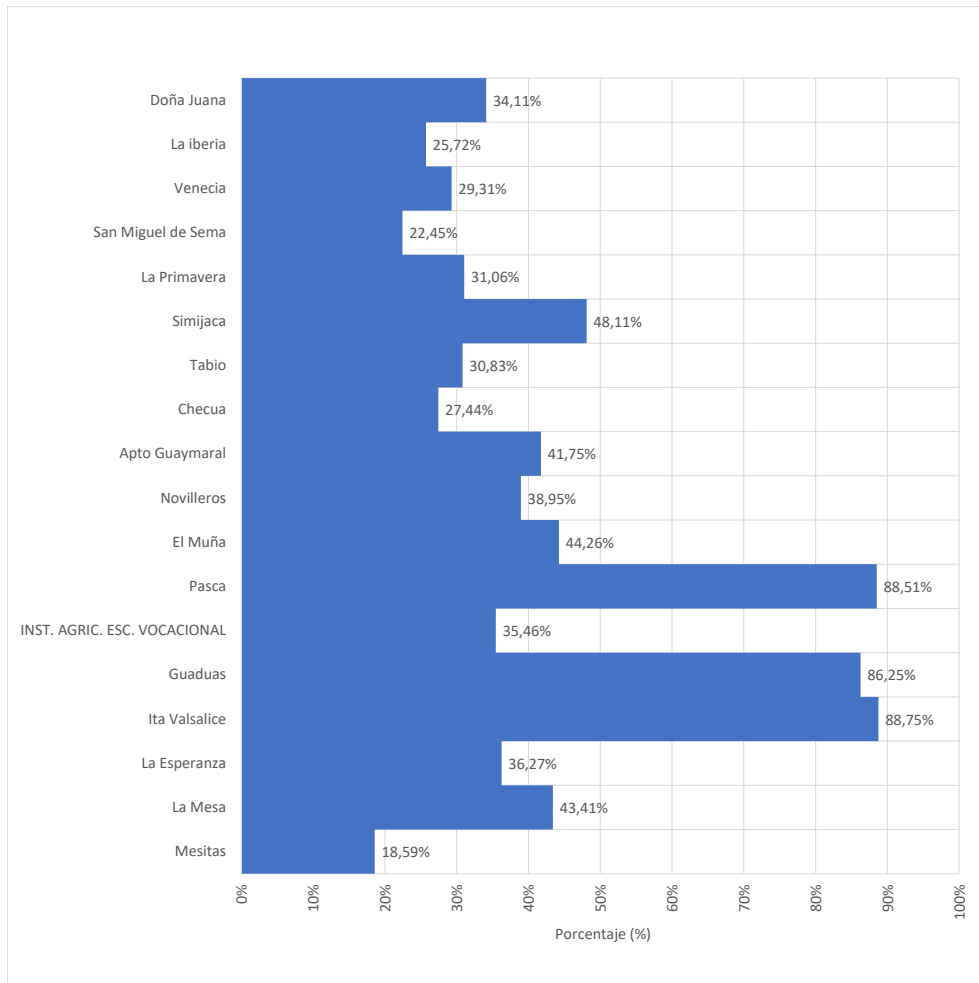
Gráfica 9-17 Humedad relativa media registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



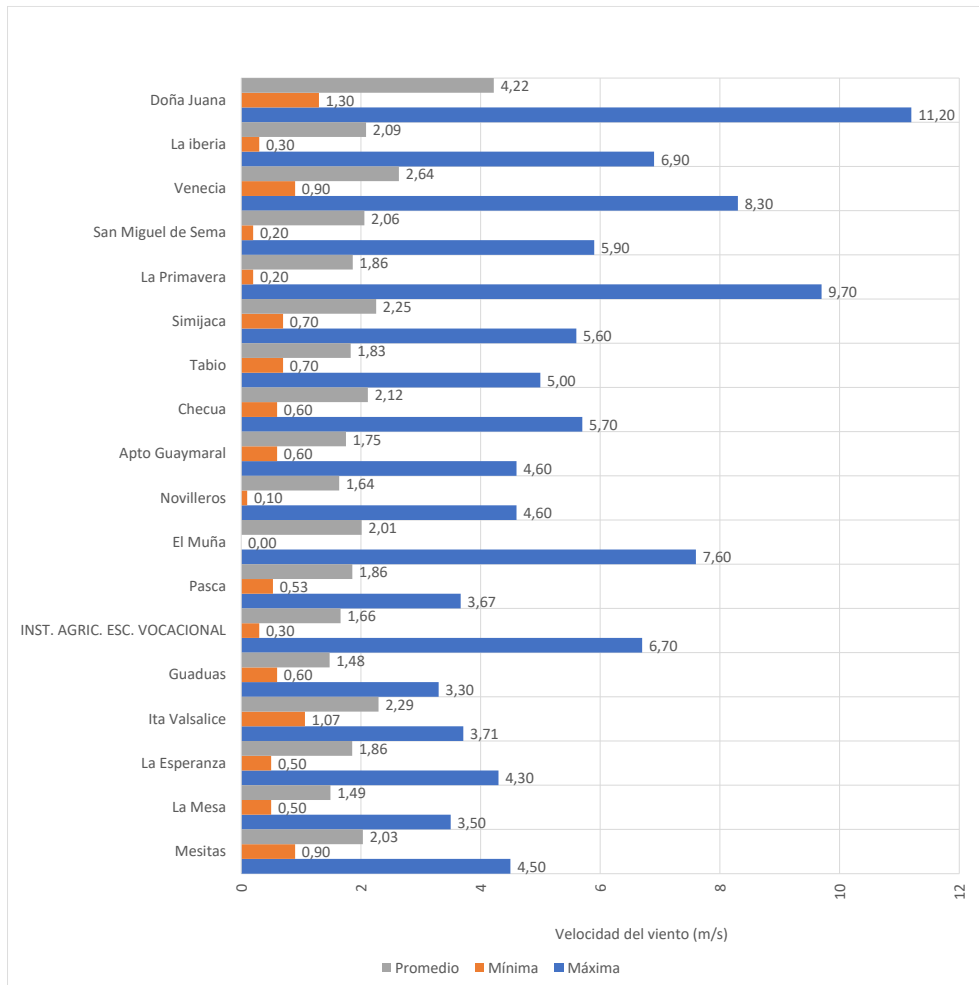
Gráfica 9-18 Temporalidad de los registros de velocidad del viento empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



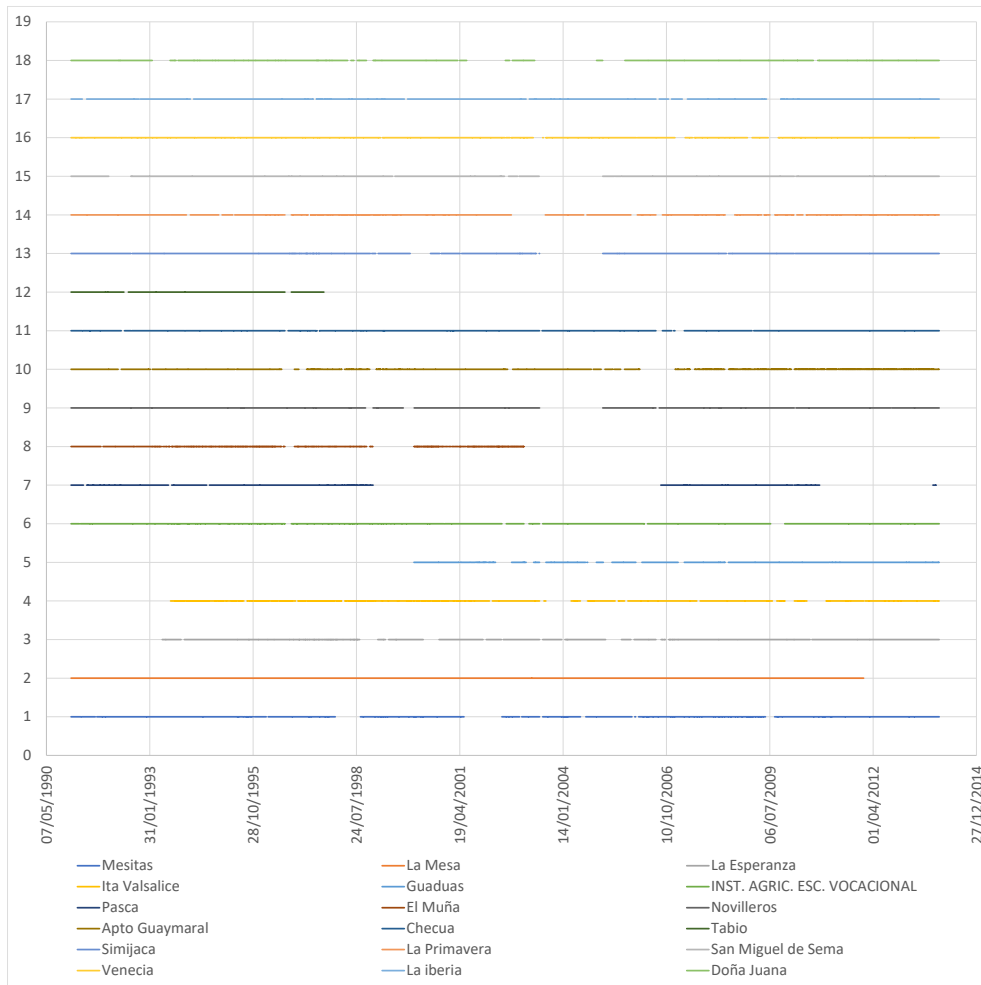
Gráfica 9-19 Porcentaje de datos faltantes de velocidad del viento empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



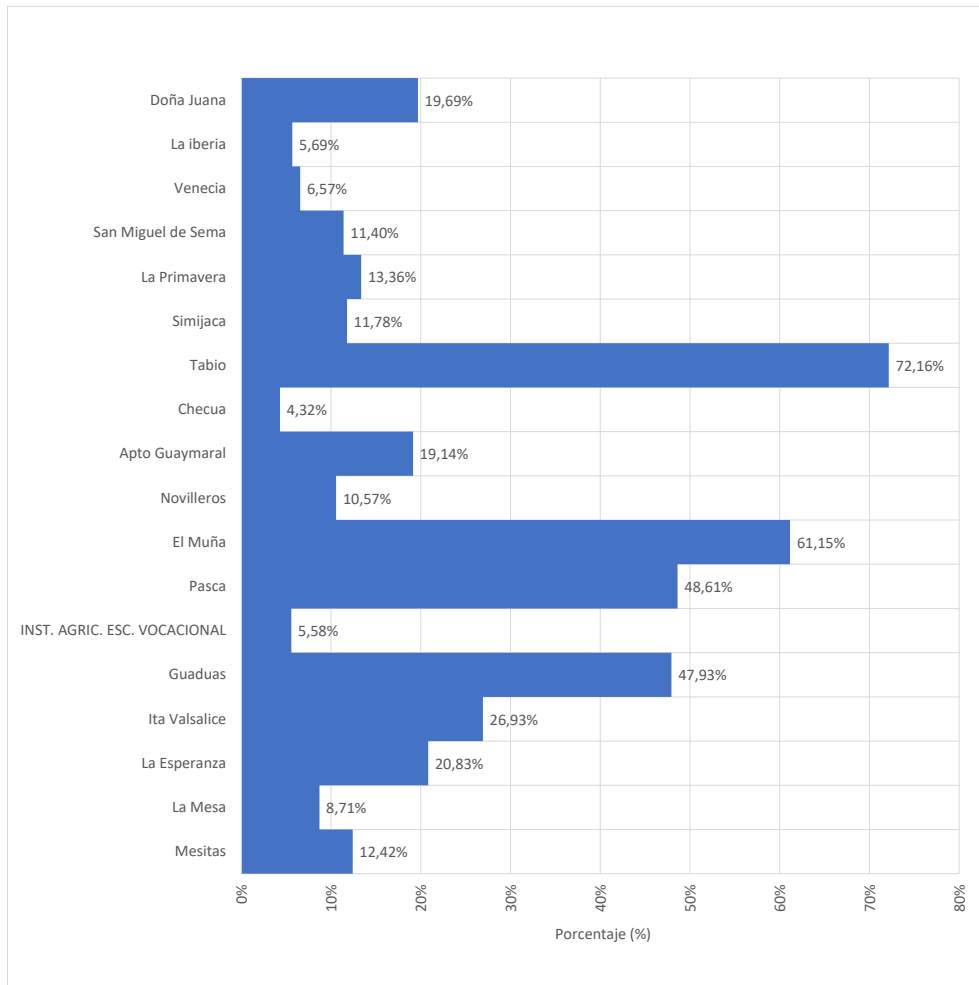
Gráfica 9-20 Velocidad del viento registrada en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



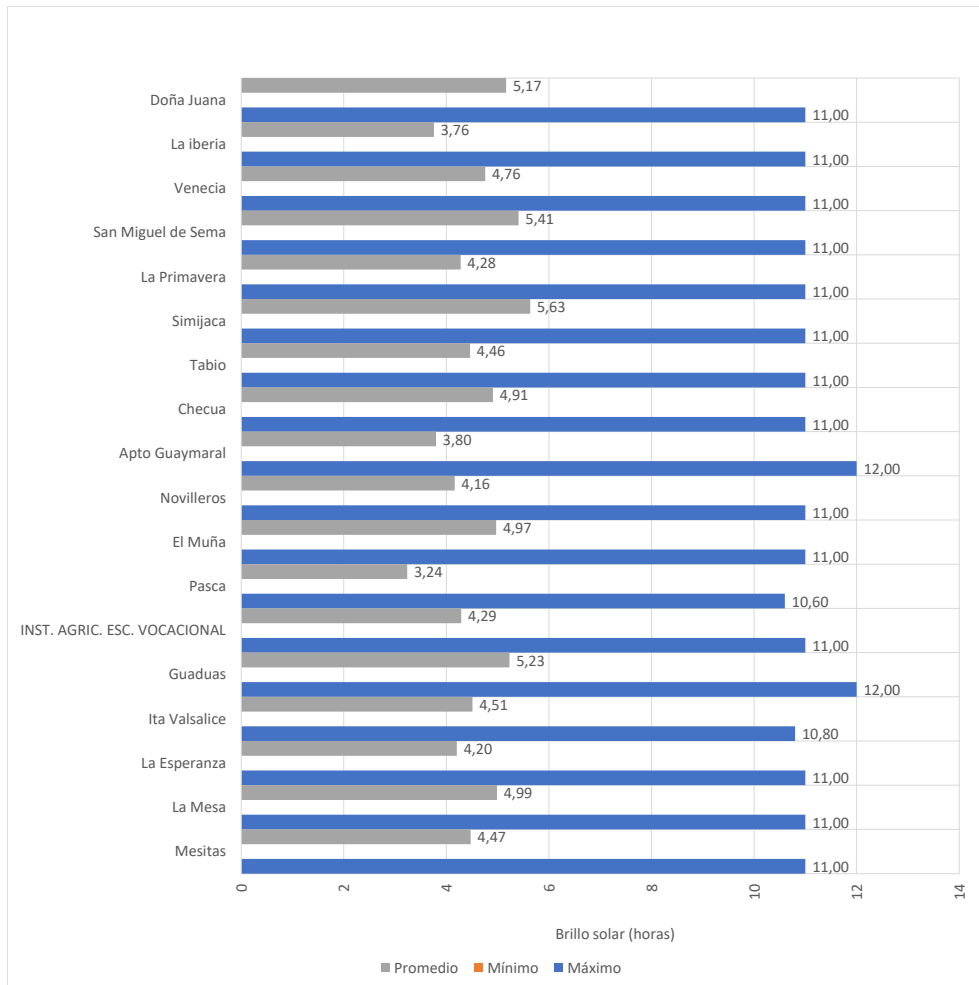
Gráfica 9-21 Temporalidad de los registros de brillo solar empleados para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



Gráfica 9-22 Porcentaje de datos faltantes de brillo solar empleados para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



Gráfica 9-23 Brillo solar registrado en las estaciones empleadas para el cálculo de la ETo

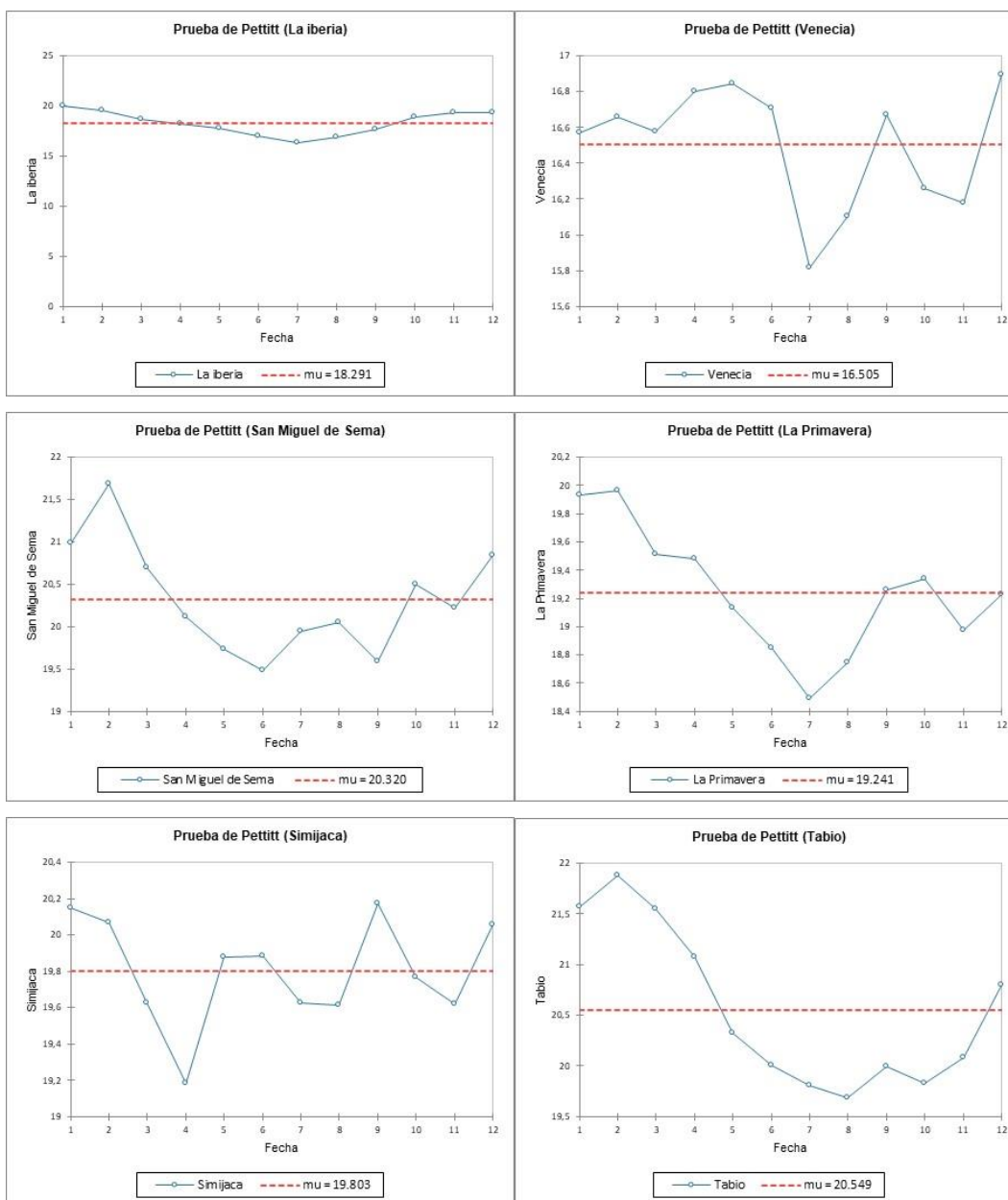
Fuente: Autor, 2023.

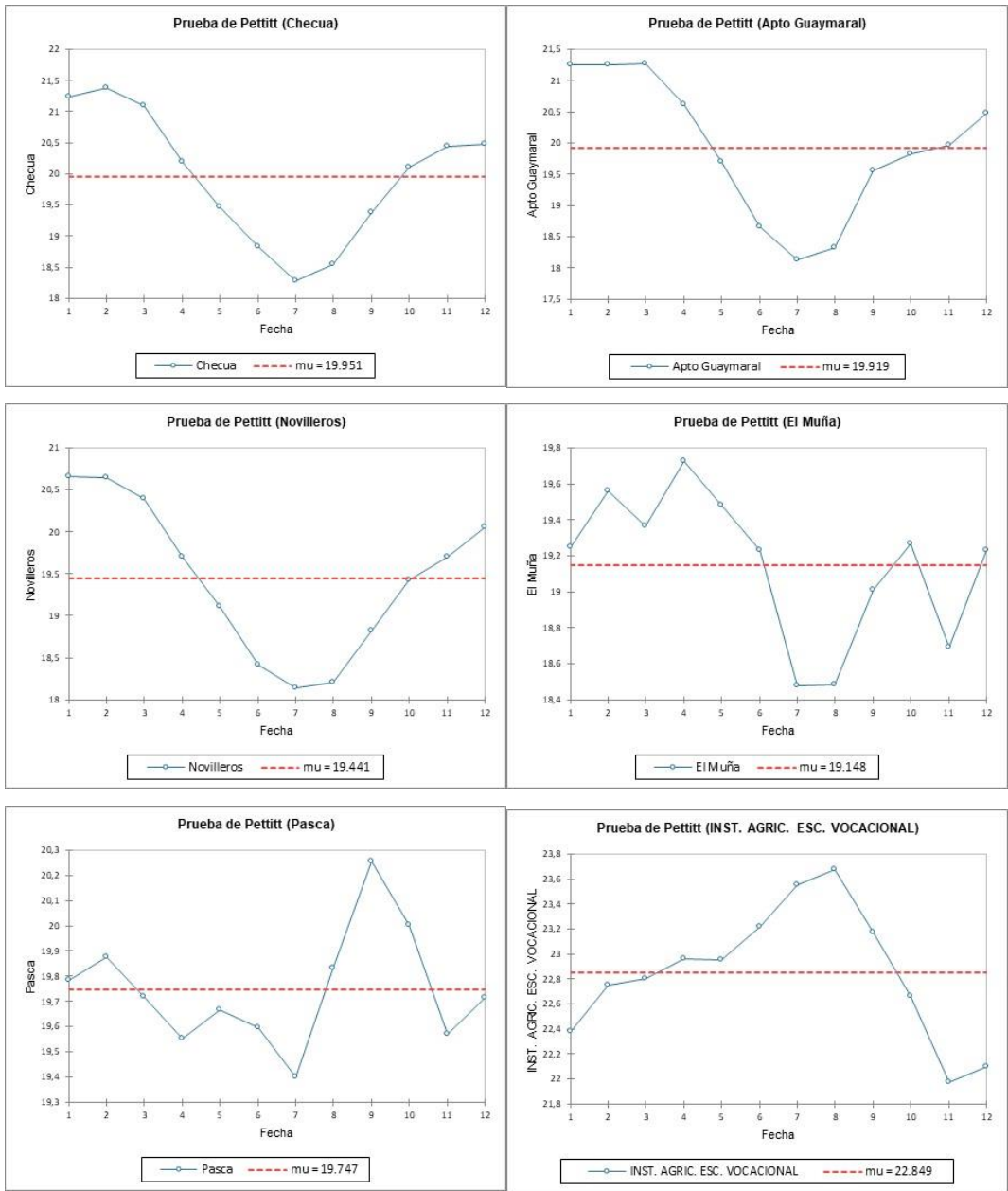
9.2 Anexo 2. Shapes de las estaciones

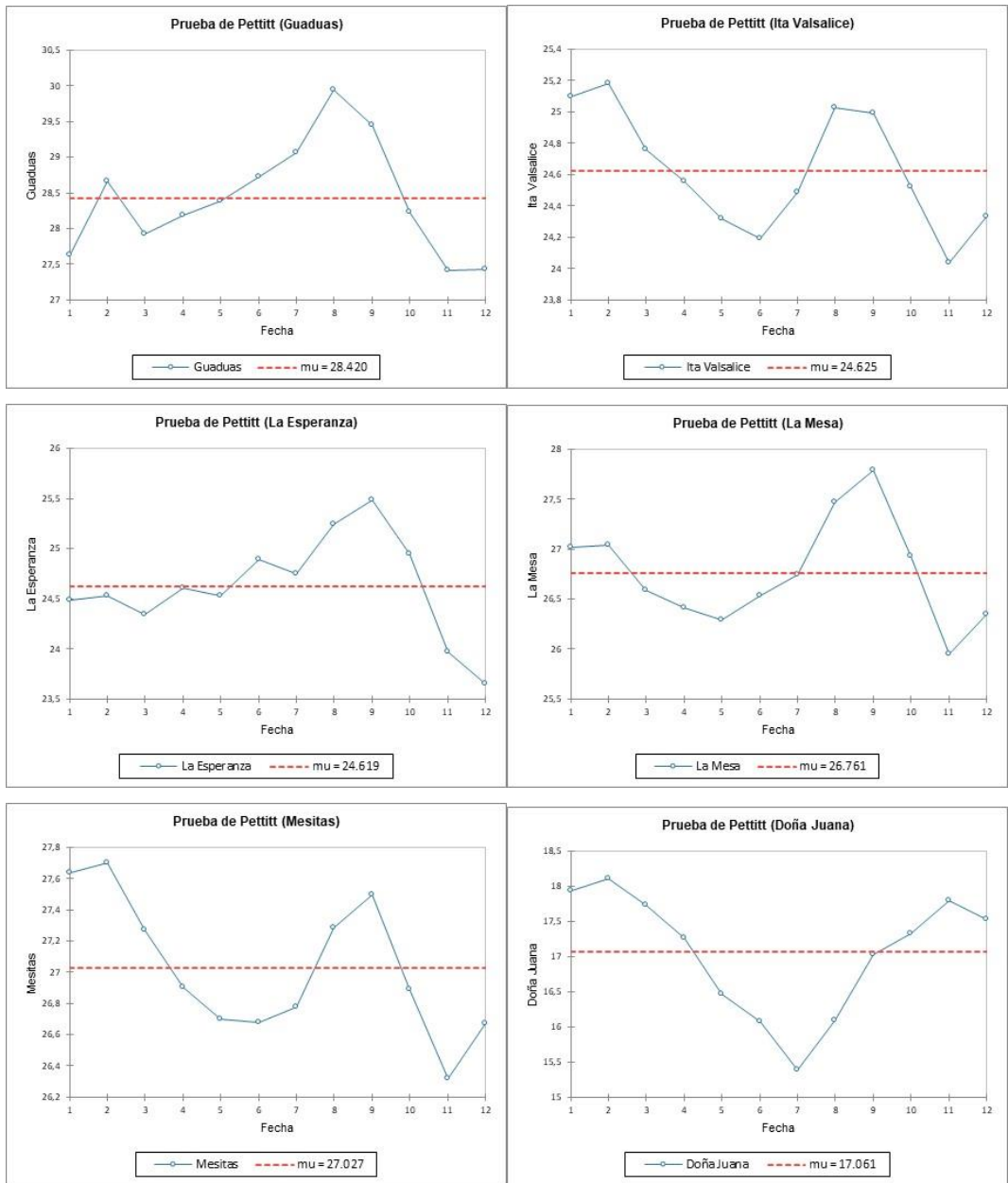
9.3 Anexo 3. Imágenes

9.4 Anexo 4. Memorias del análisis estadístico de la información climatológica

9.4.1 Parámetros climáticos para el cálculo de la ETo

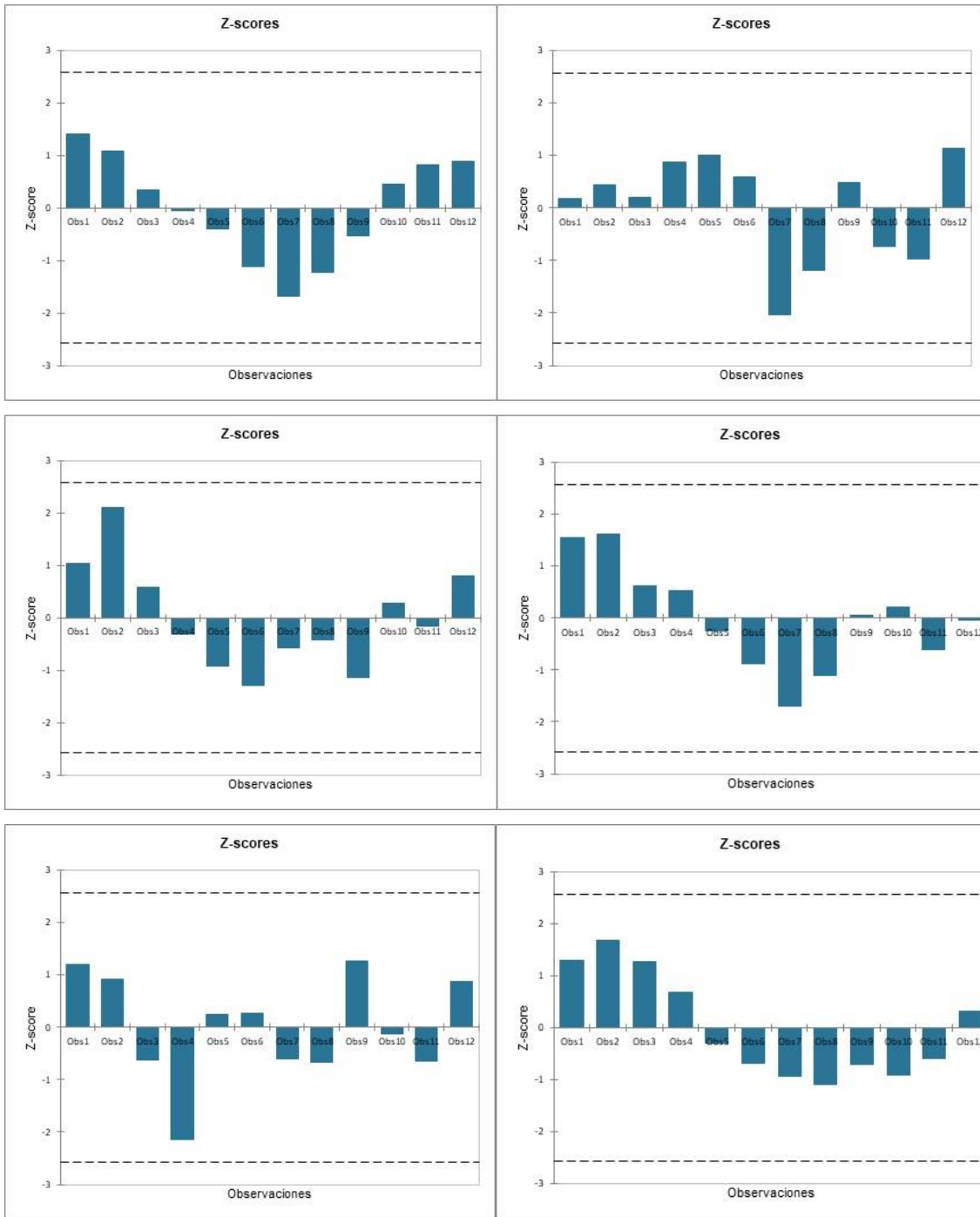


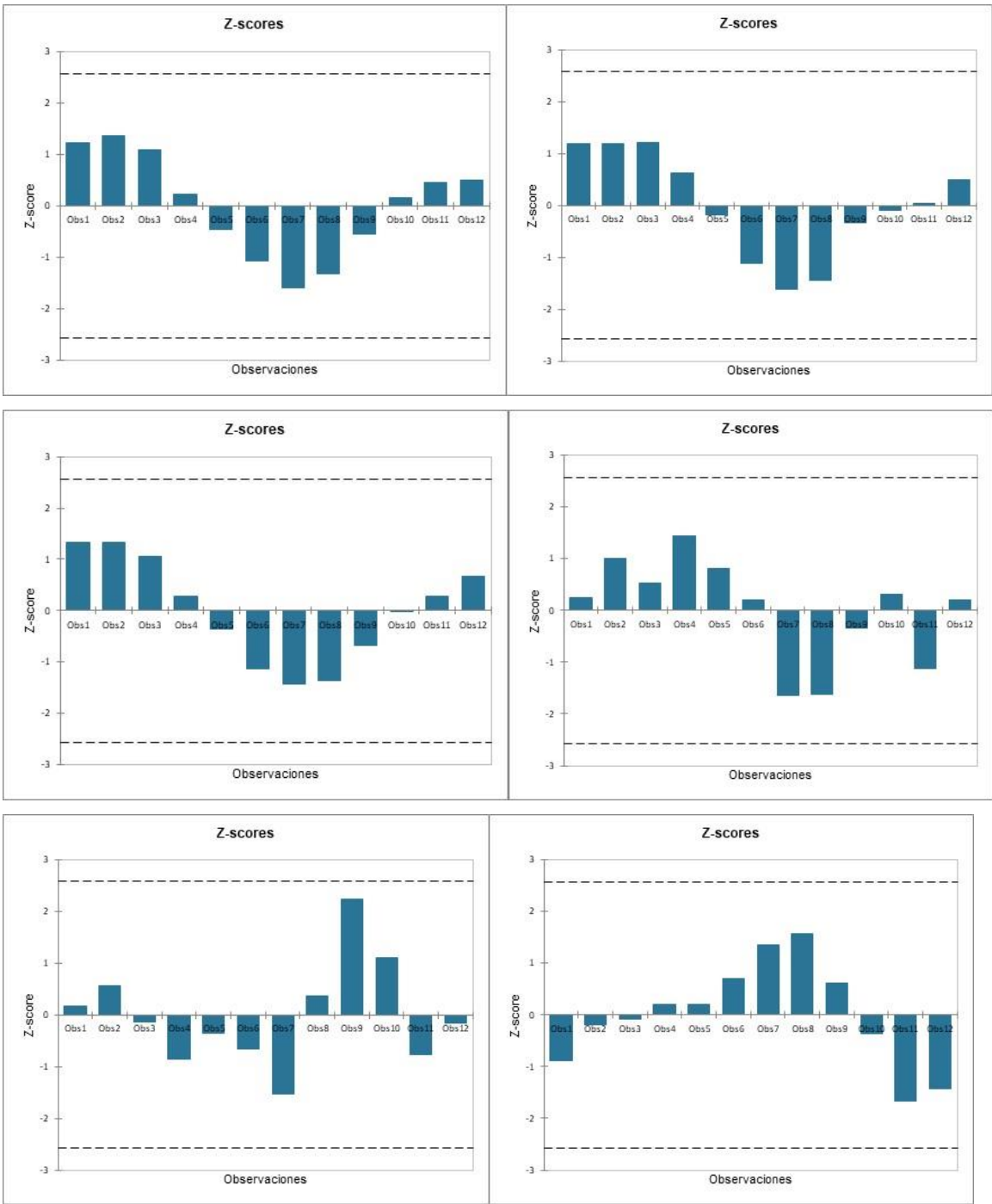


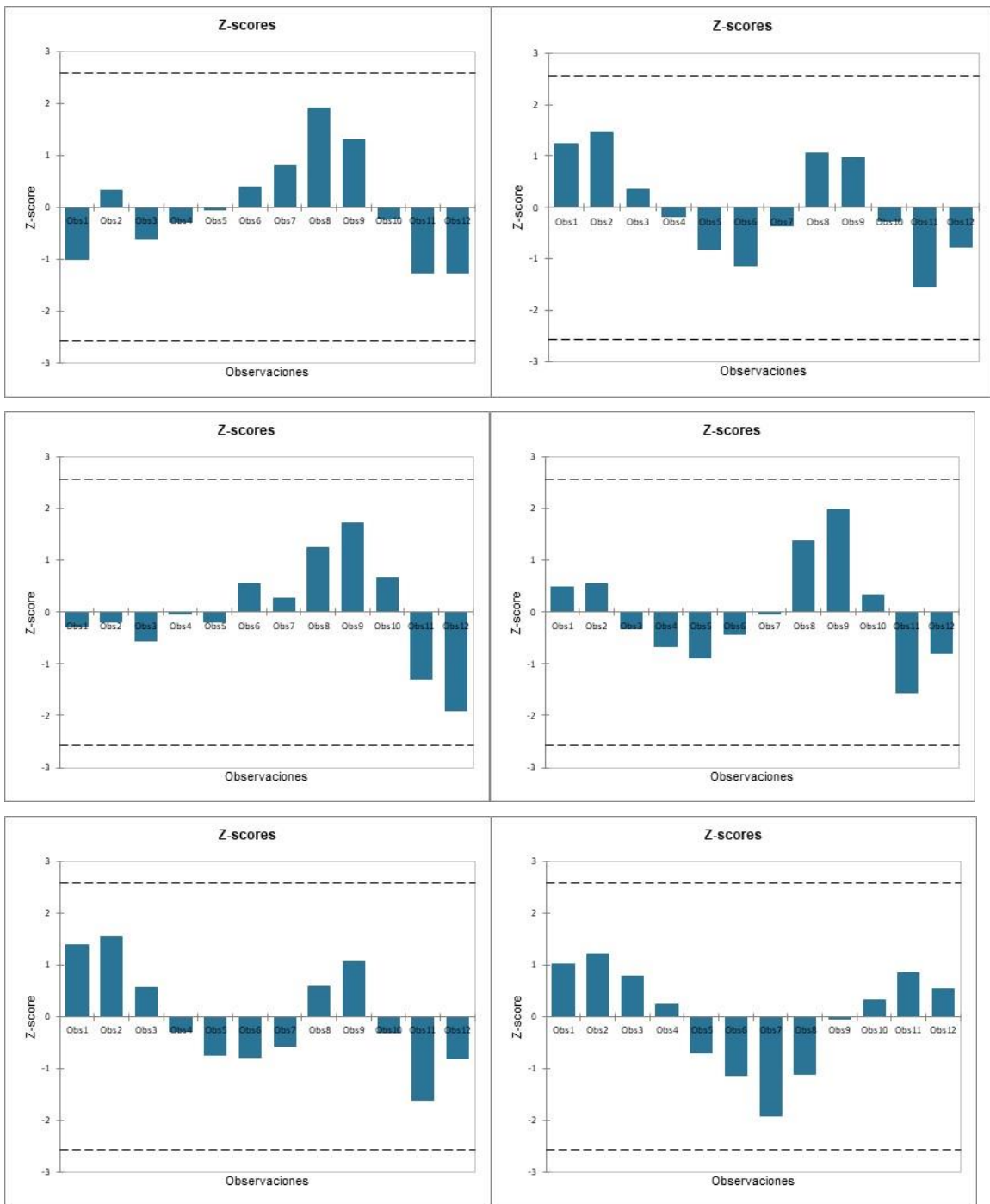


Gráfica 9-24 Valores de temperatura máxima promedio

Fuente: Autor, 2023.

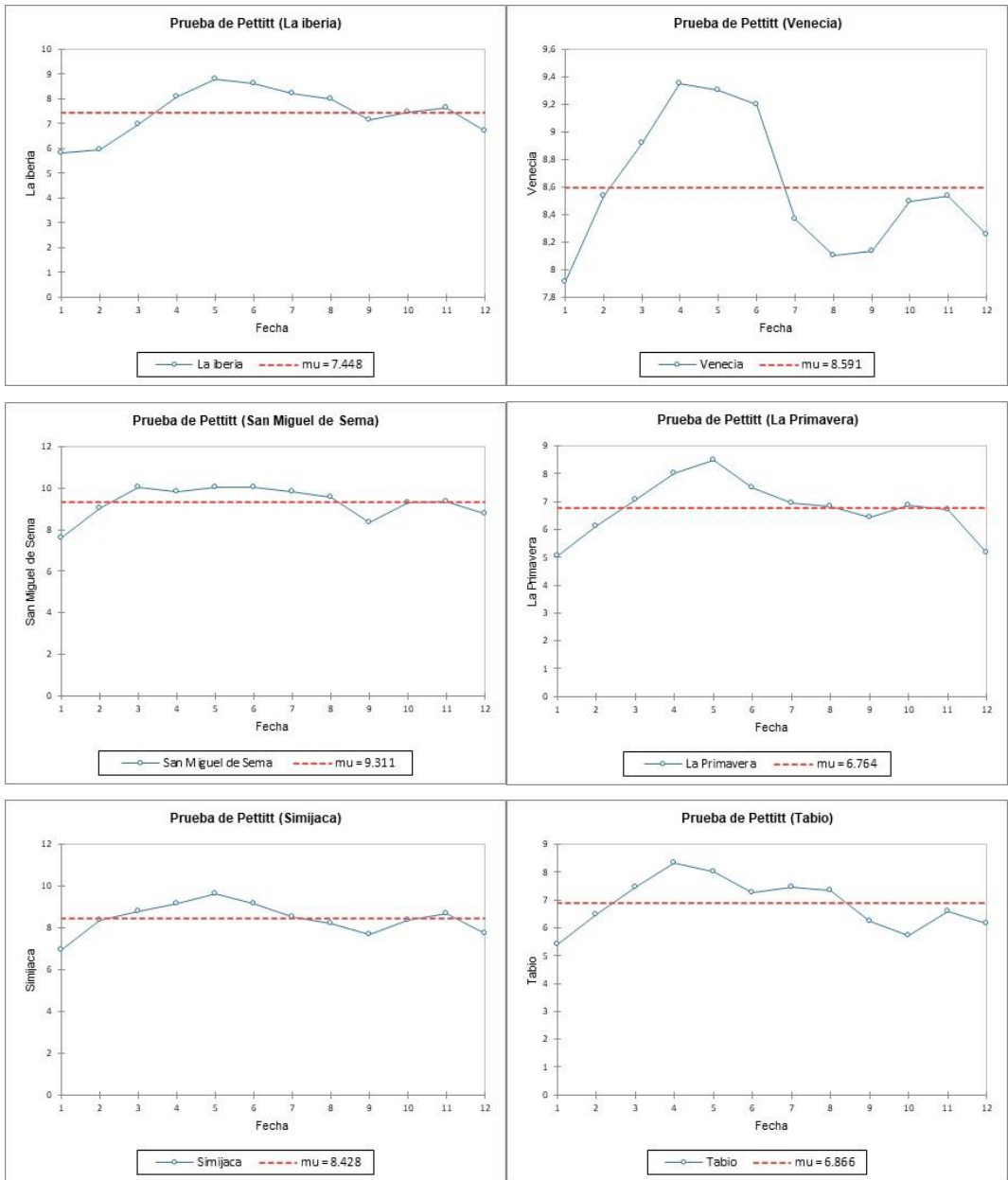


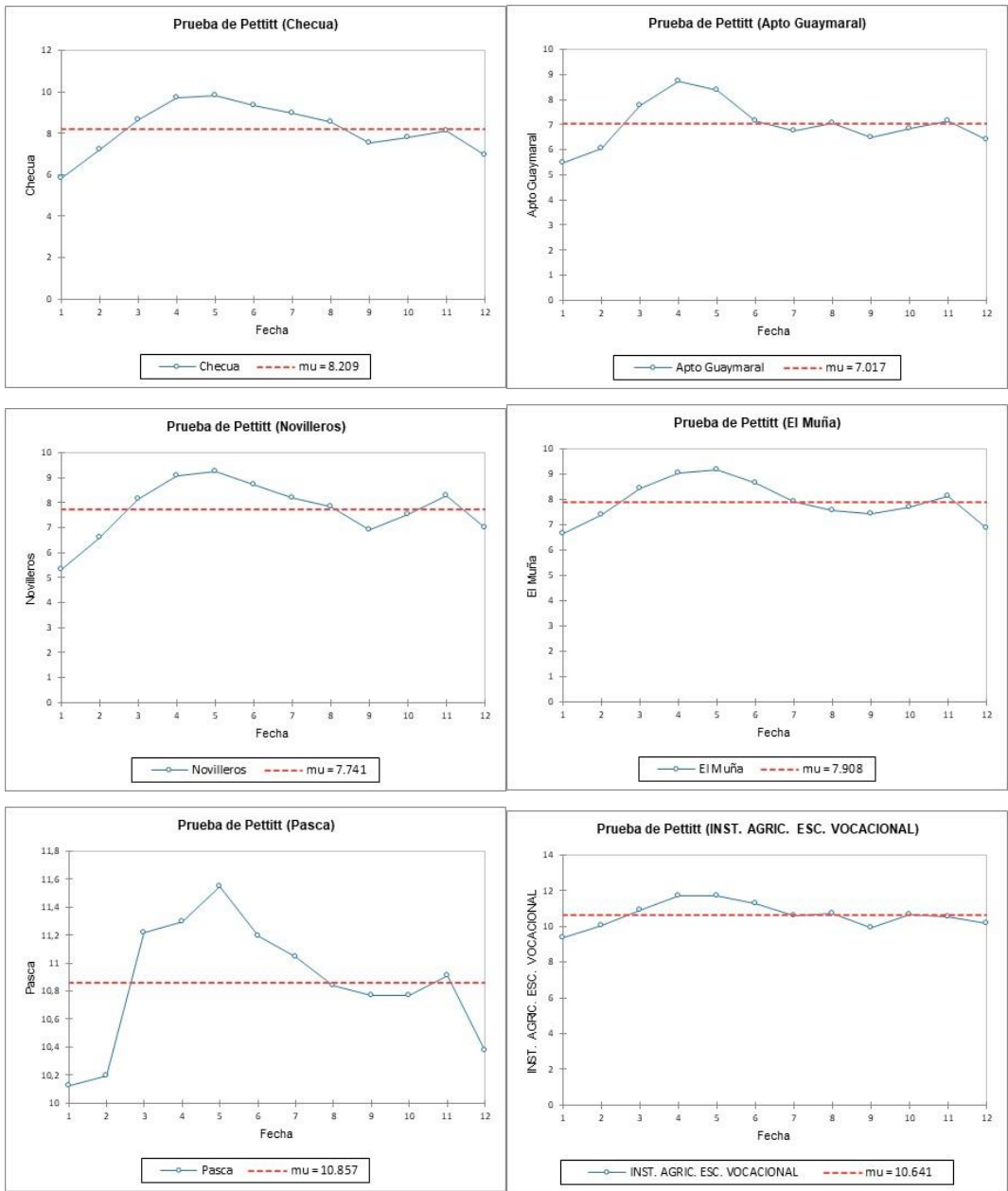


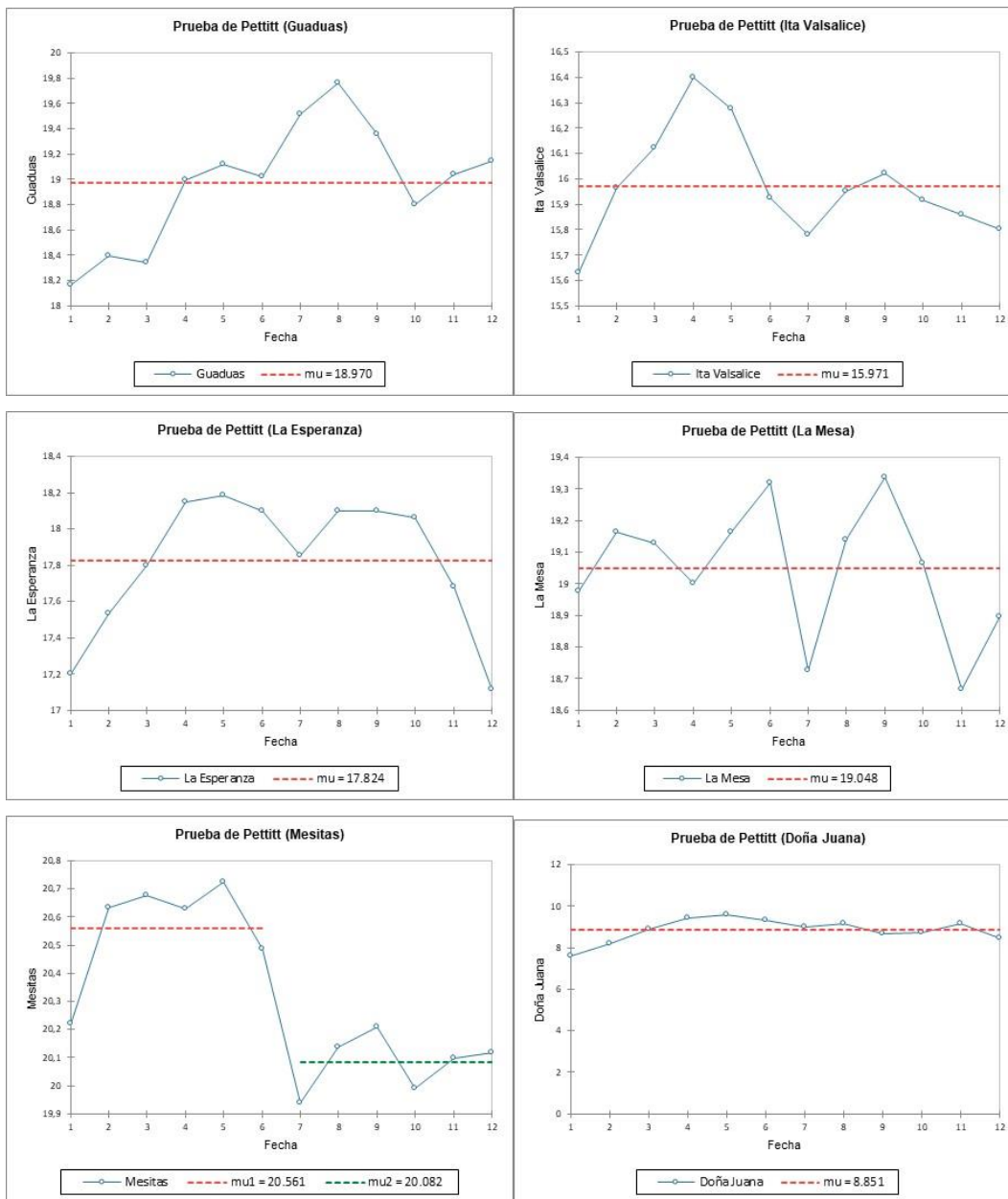


Gráfica 9-25 Prueba de Grubbs de las series de temperatura máxima empleadas para el cálculo de la ET₀

Fuente: Autor, 2023.

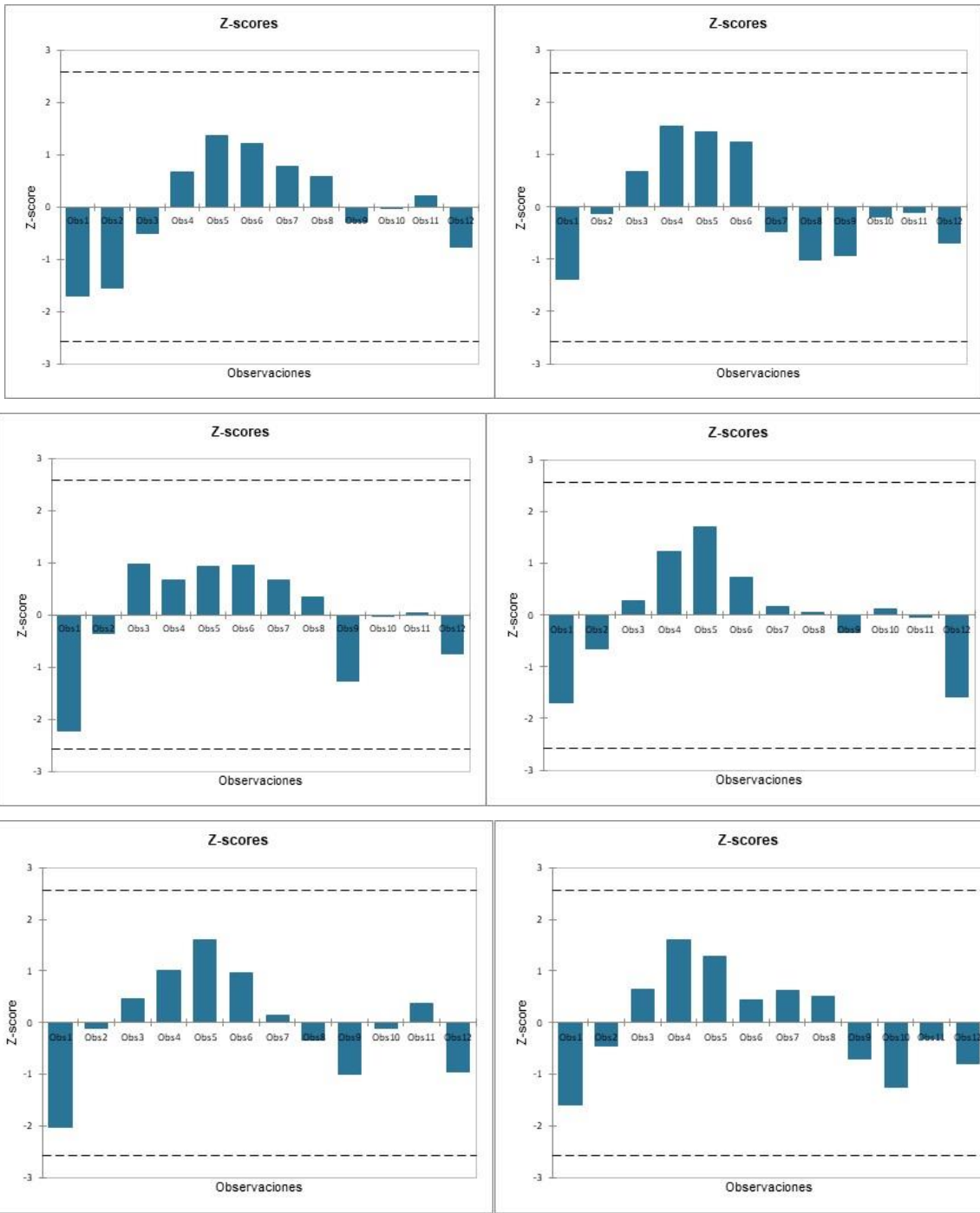


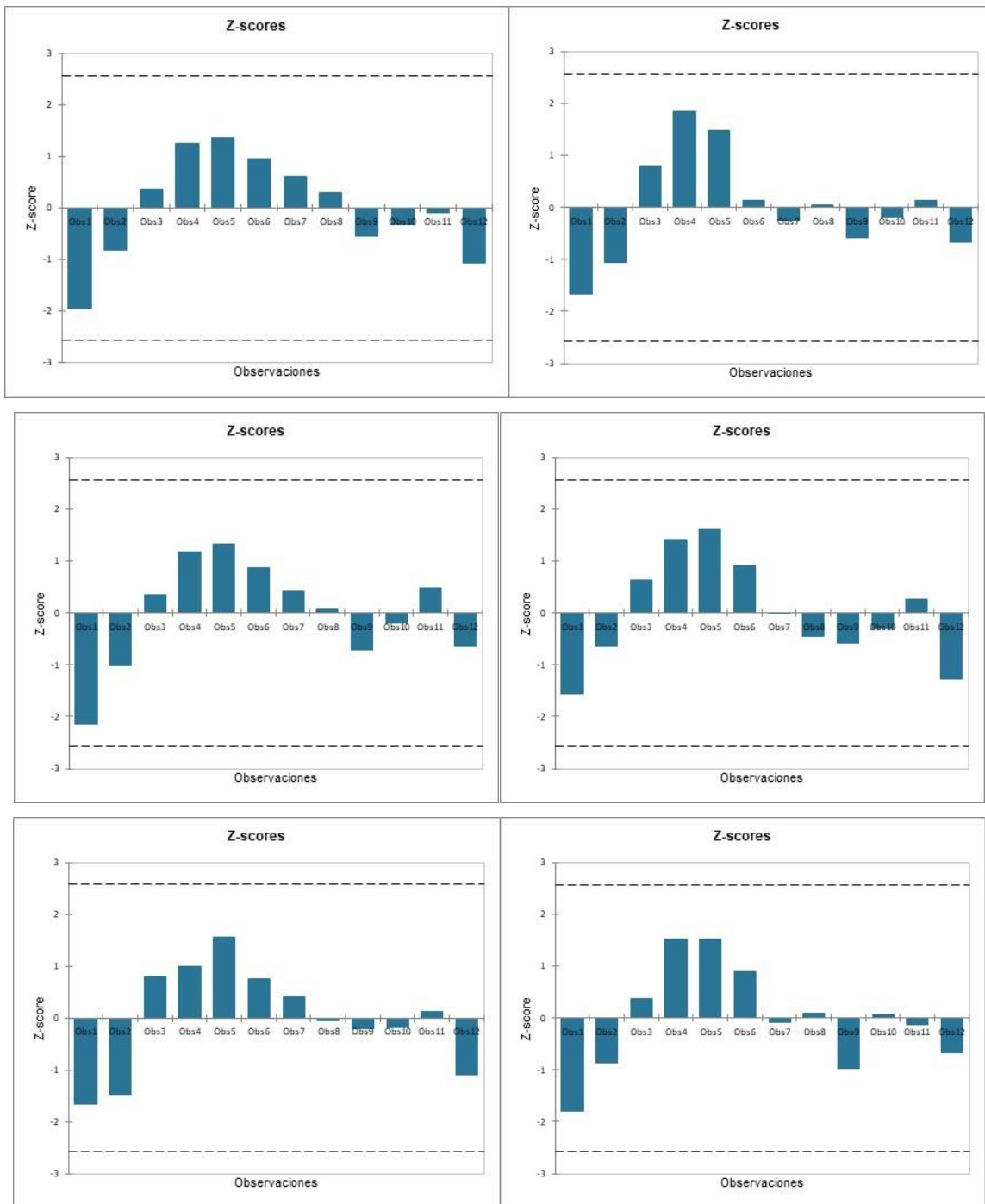


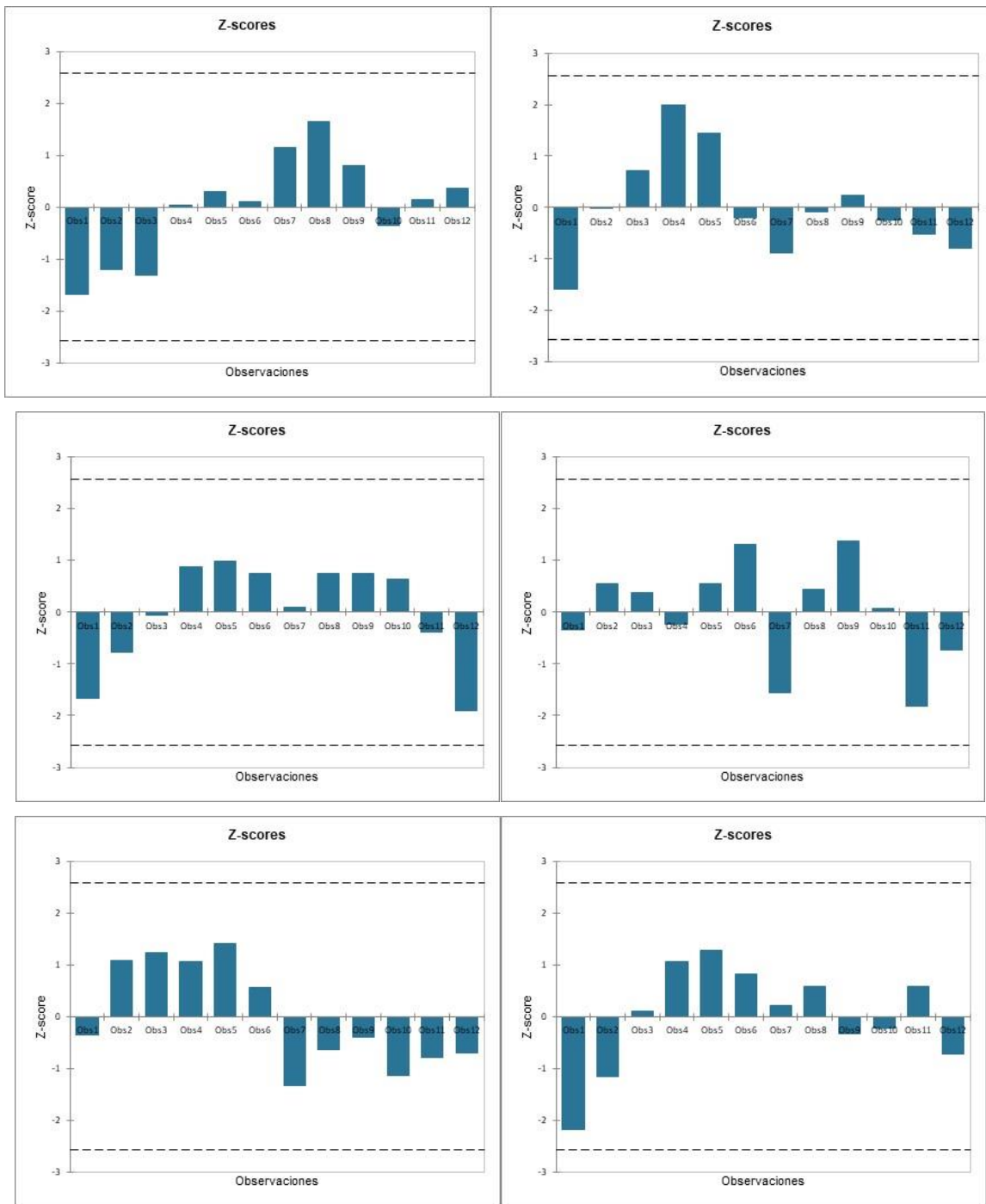


Gráfica 9-26 Valores de temperatura mínima promedio

Fuente: Autor, 2023.

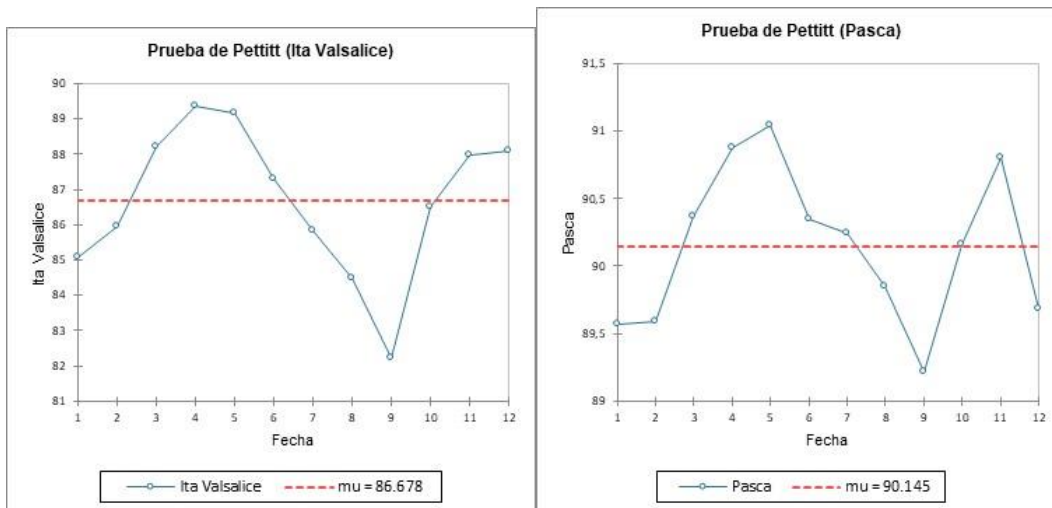






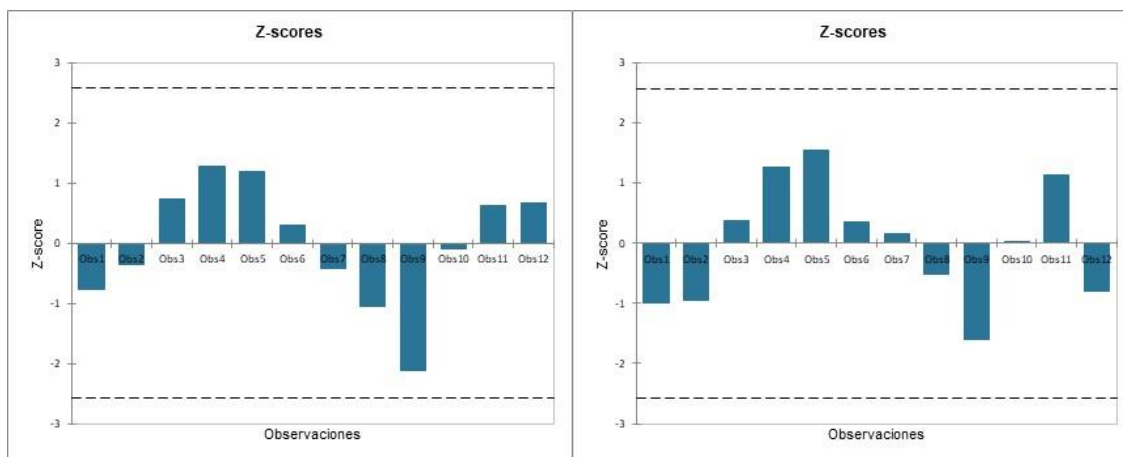
Gráfica 9-27 Prueba de Grubbs de las series de temperatura mínima empleadas para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.



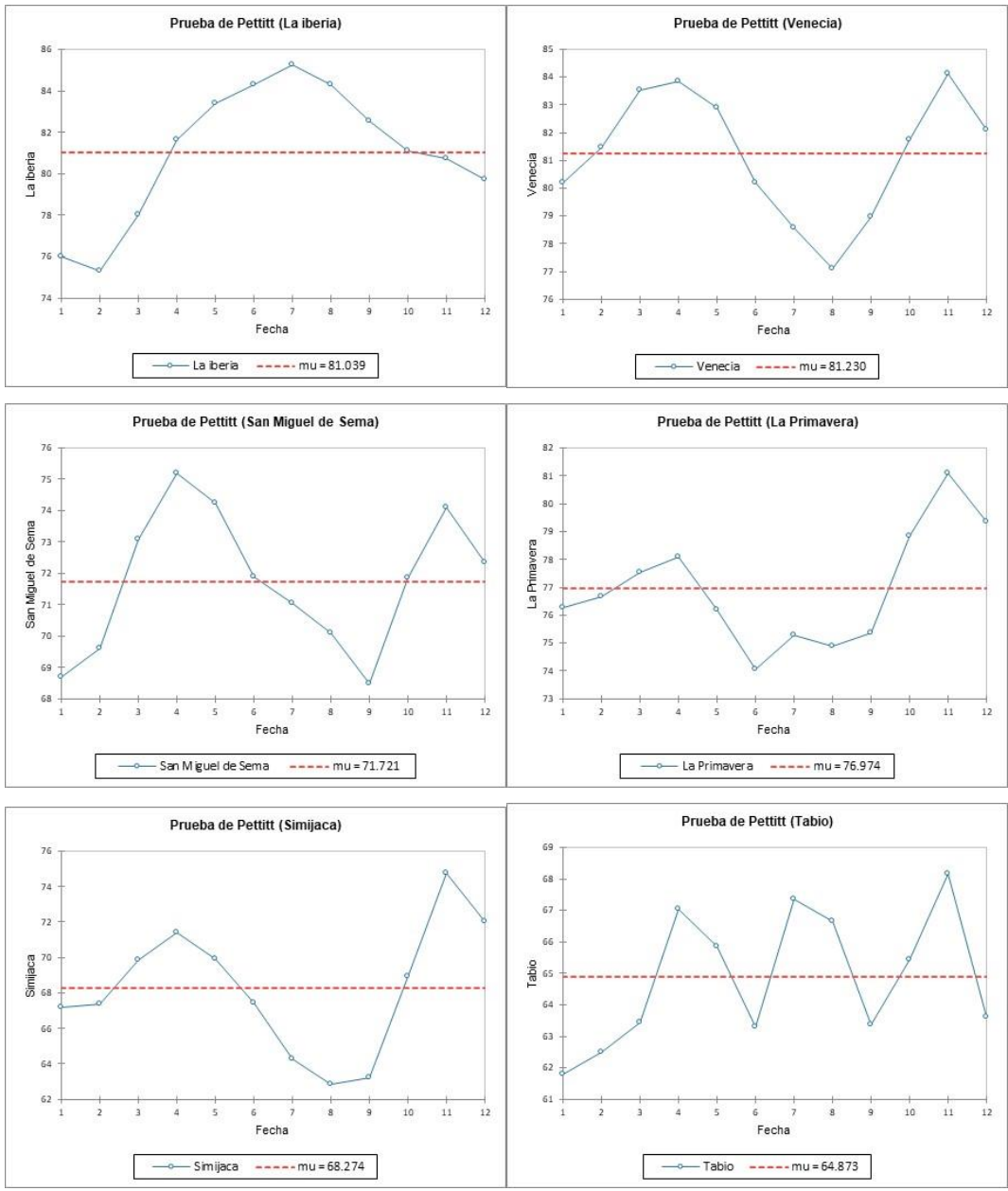
Gráfica 9-28 Valores de humedad relativa máxima promedio

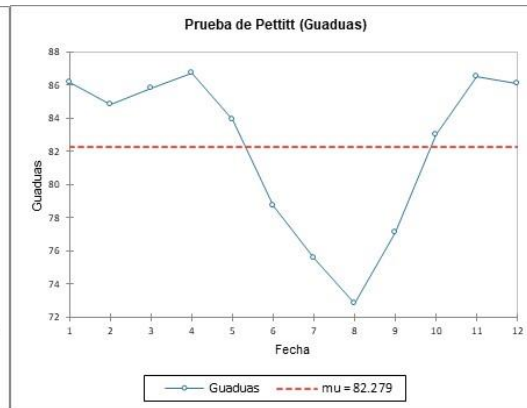
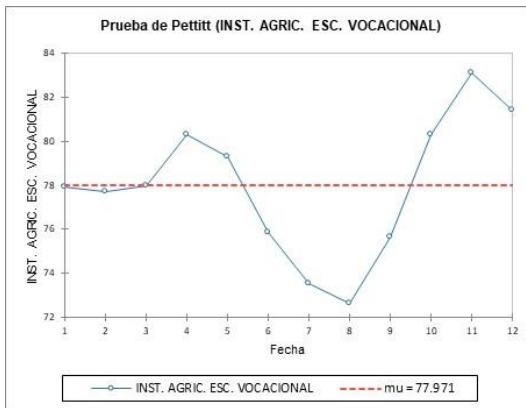
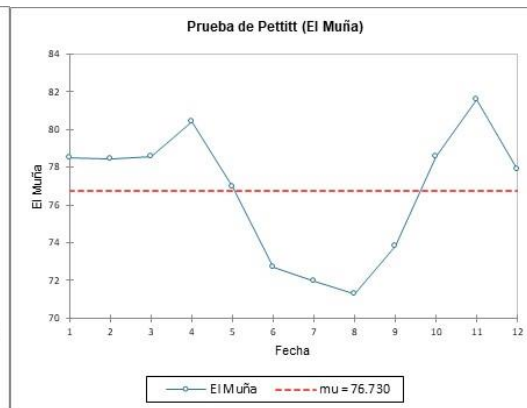
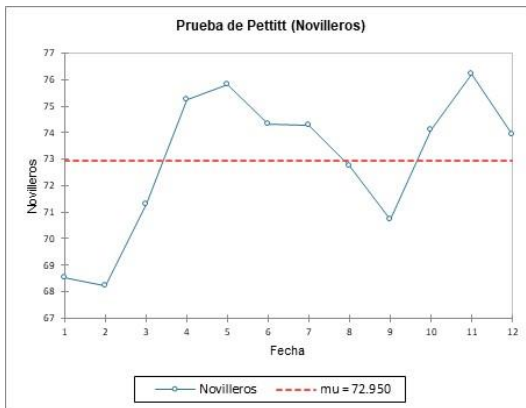
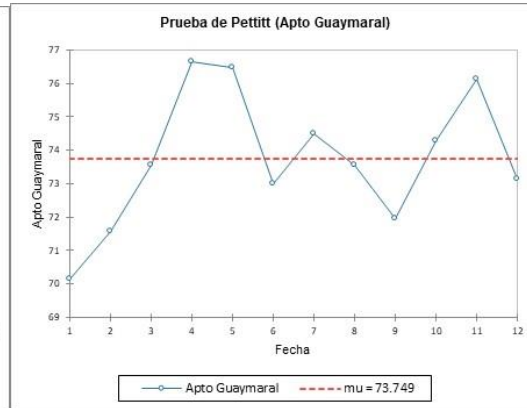
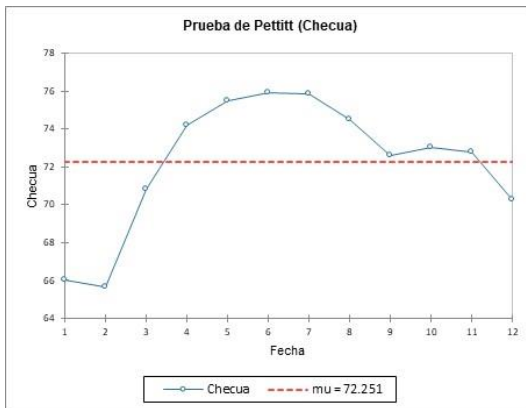
Fuente: Autor, 2023.

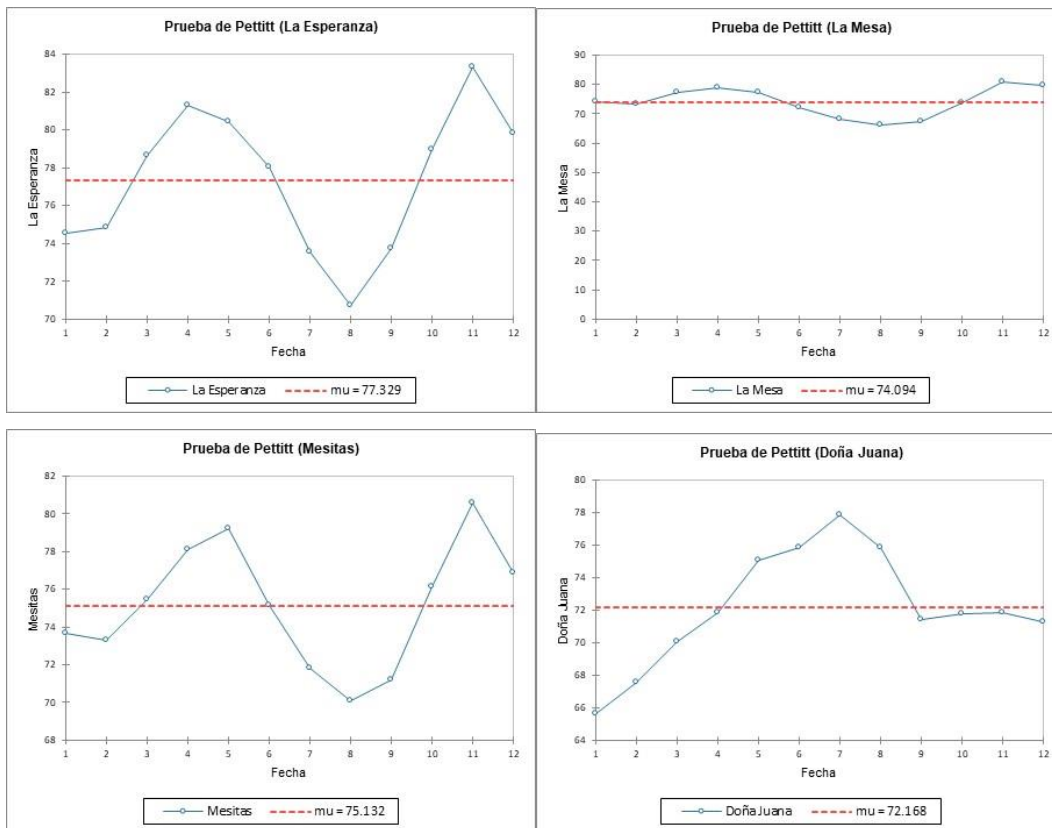


Gráfica 9-29 Prueba de Grubbs de las series de humedad relativa máxima empleadas para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.

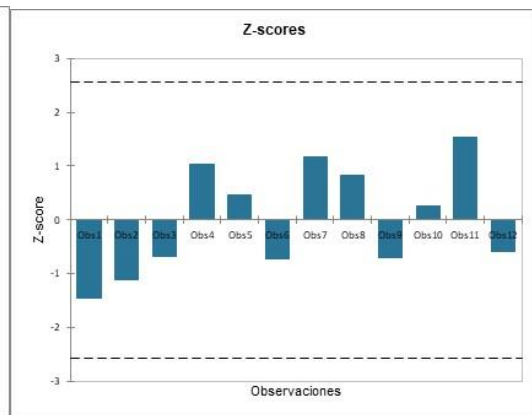
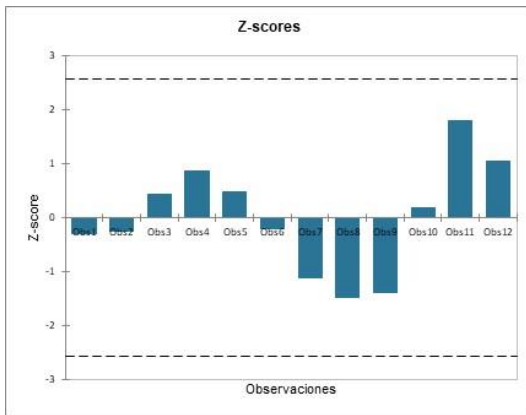
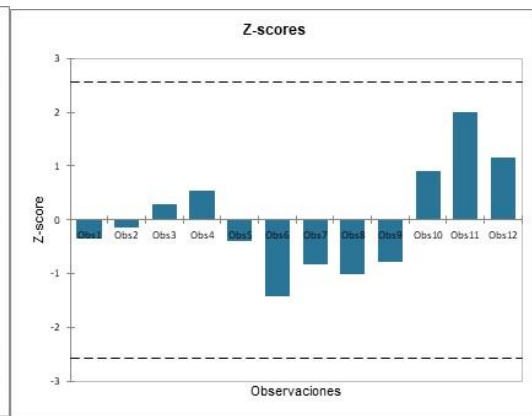
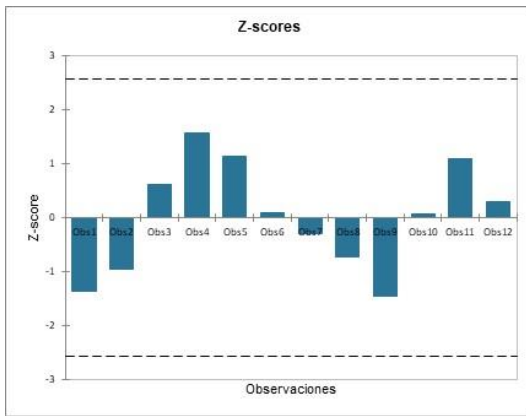
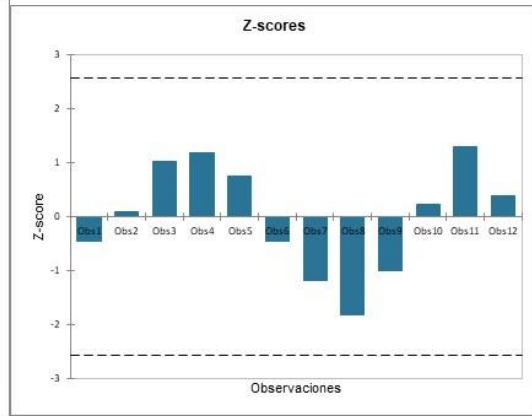
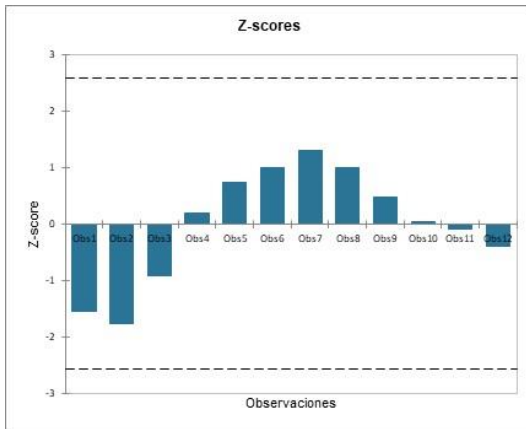


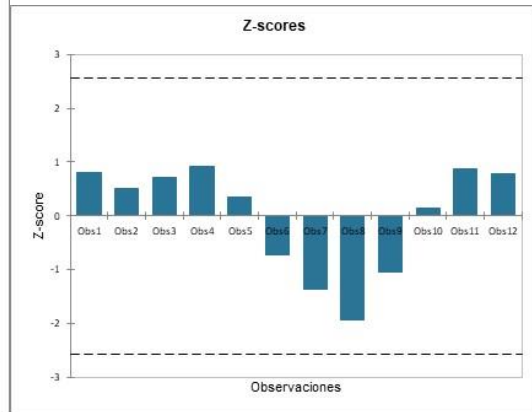
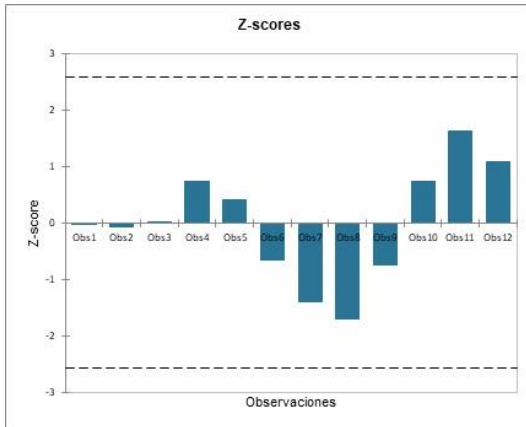
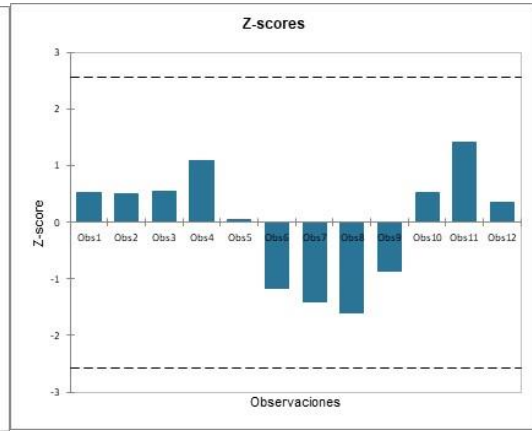
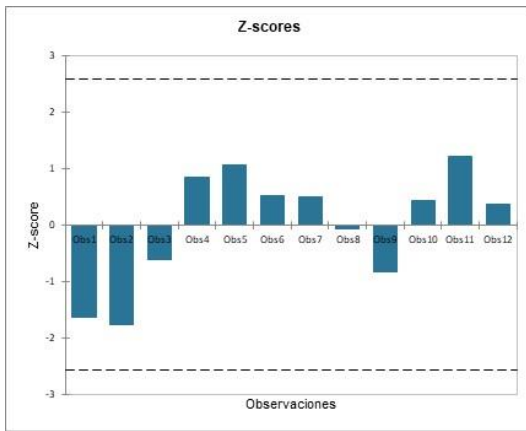
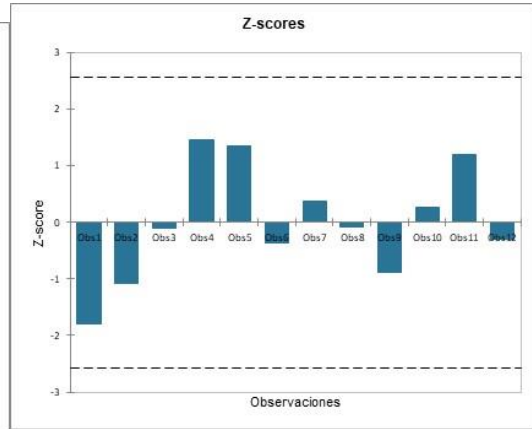
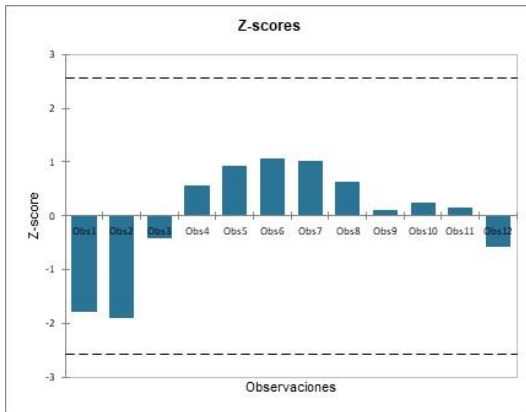


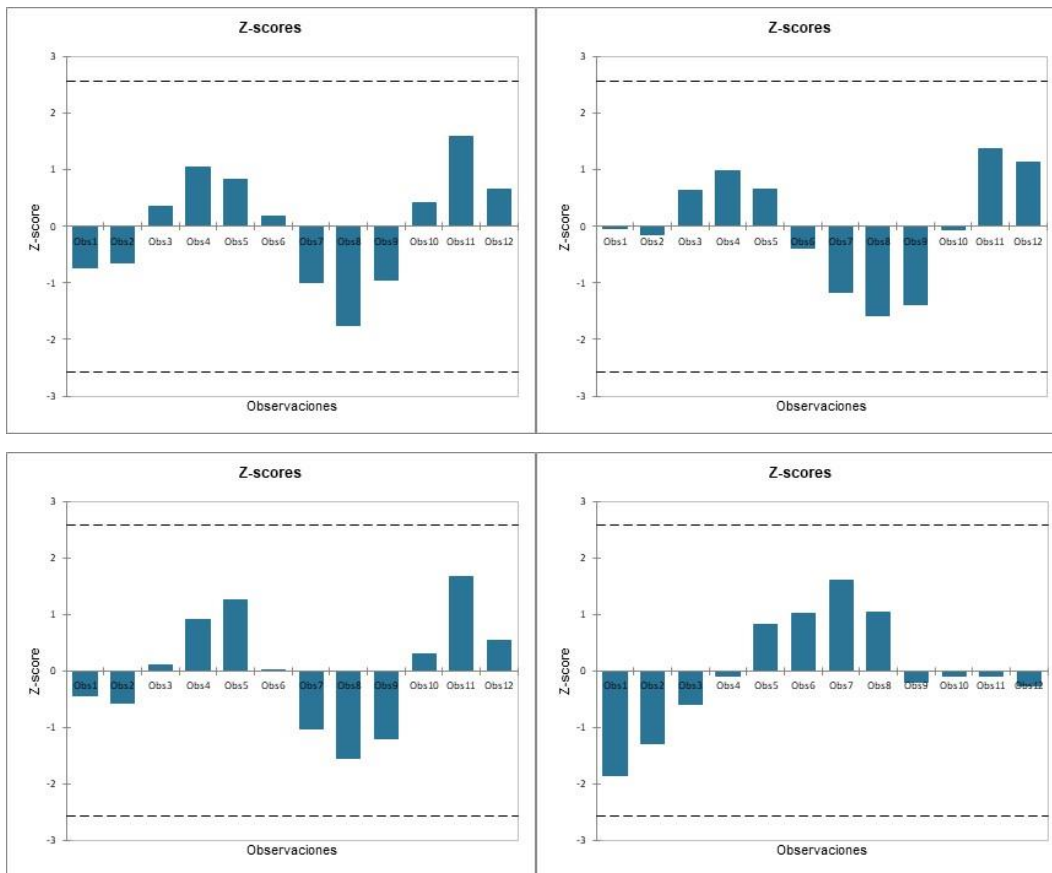


Gráfica 9-30 Valores de humedad relativa media promedio

Fuente: Autor, 2023.

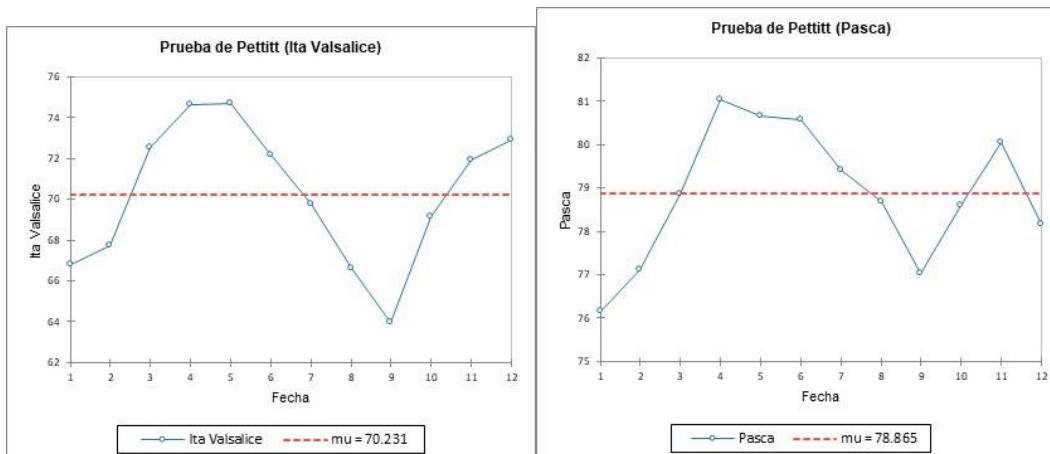






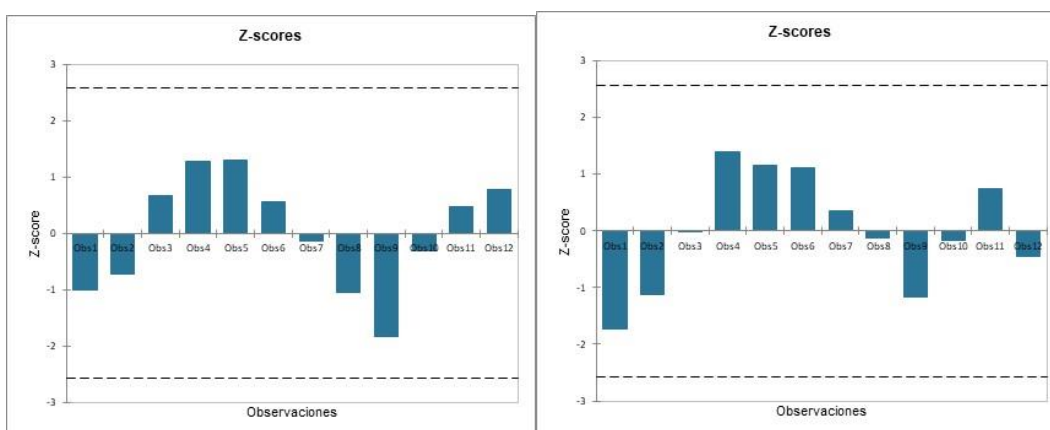
Gráfica 9-31 Prueba de Grubbs de las series de humedad relativa media empleadas para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.



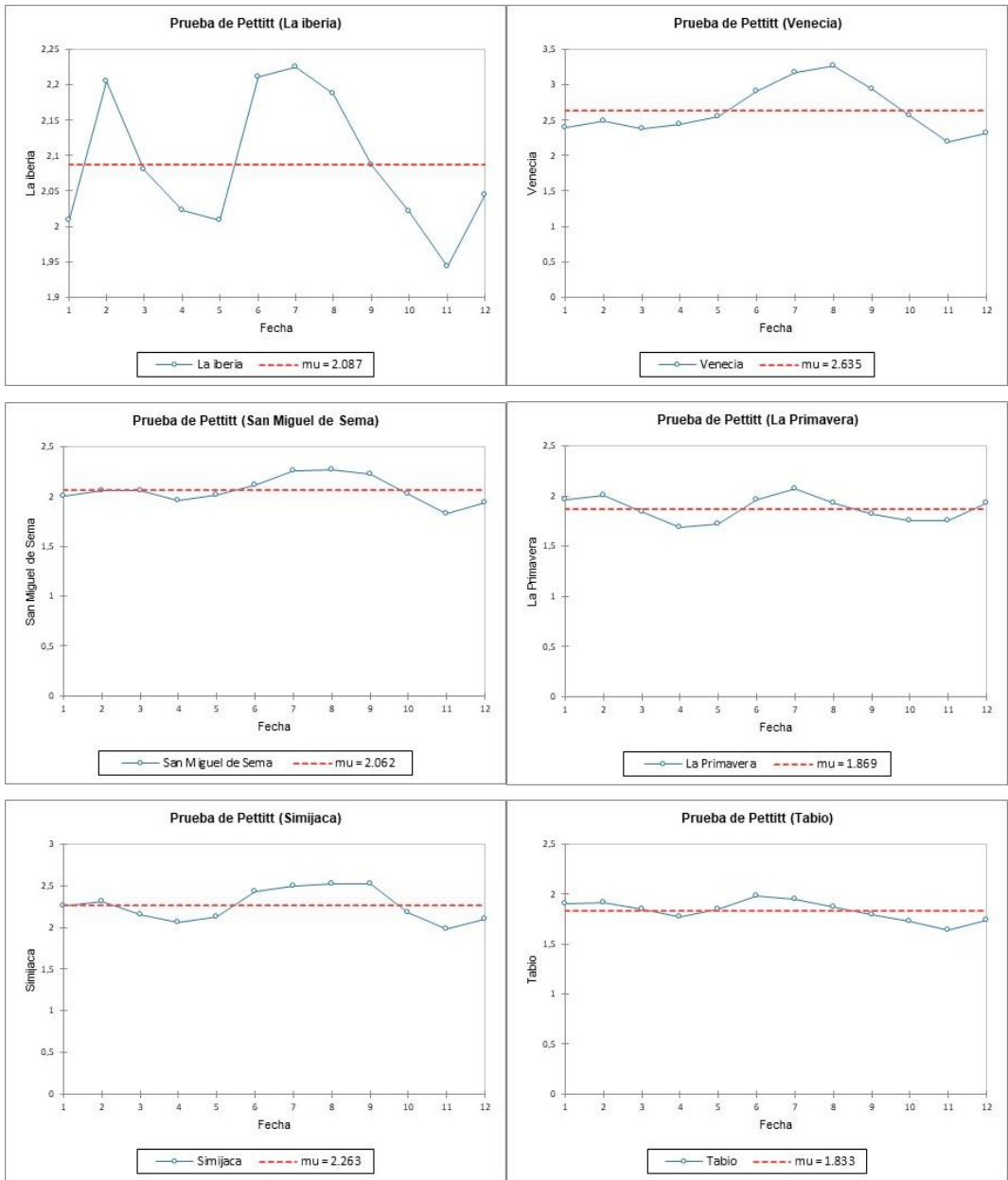
Gráfica 9-32 Valores de humedad relativa mínima promedio

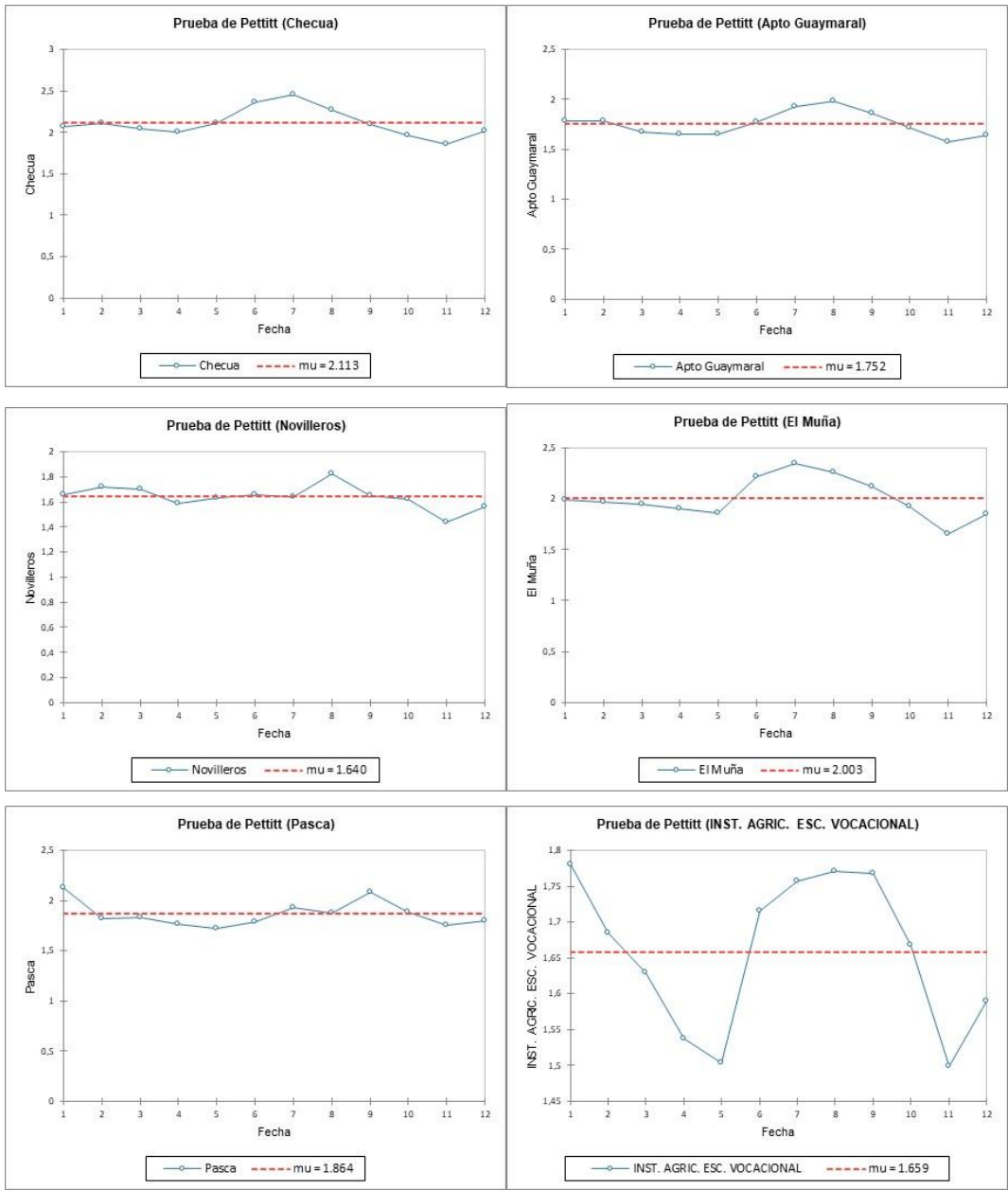
Fuente: Autor, 2023.

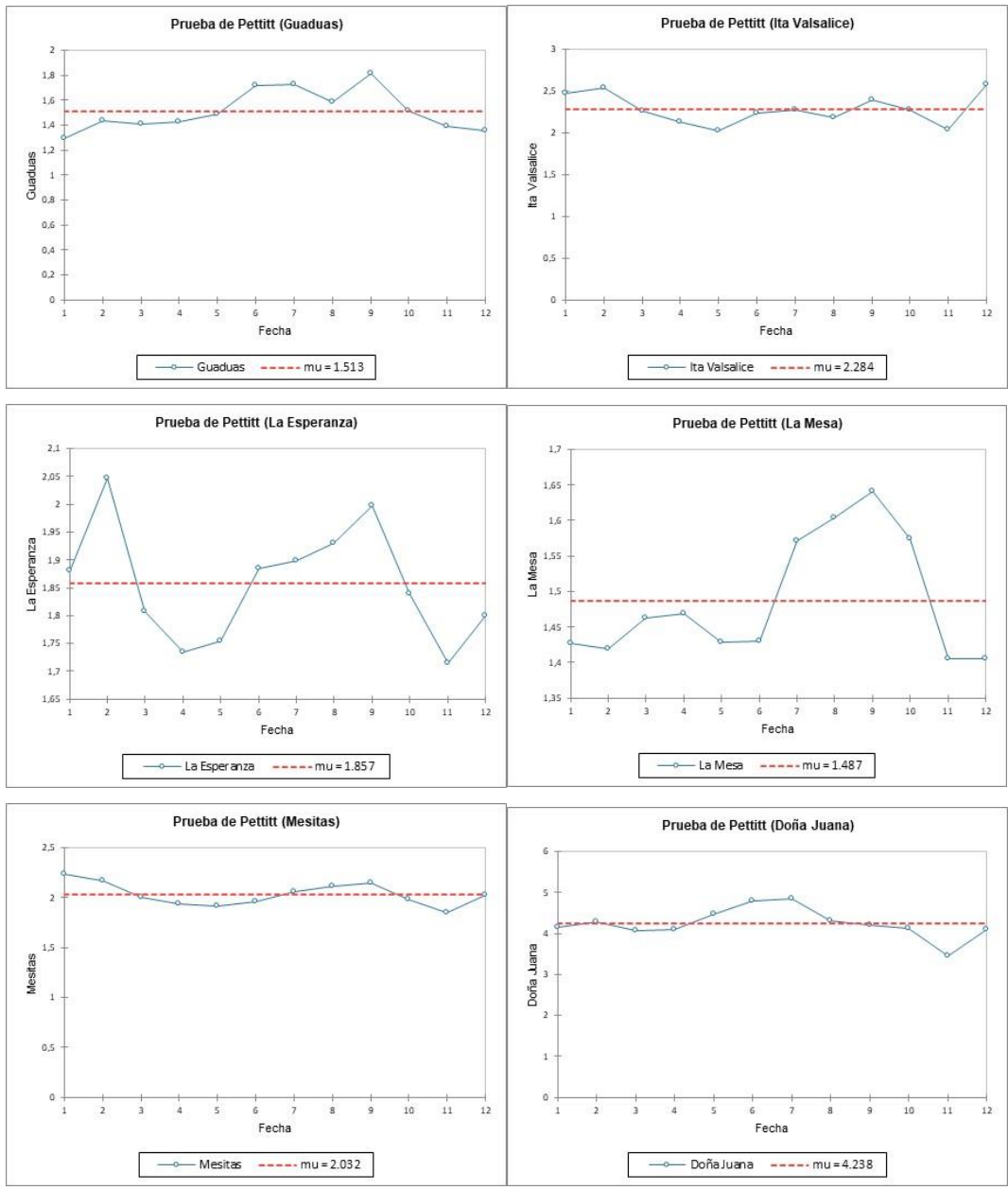


Gráfica 9-33 Prueba de Grubbs de las series de humedad relativa mínima empleadas para el cálculo de la ETO

Fuente: Autor, 2023.

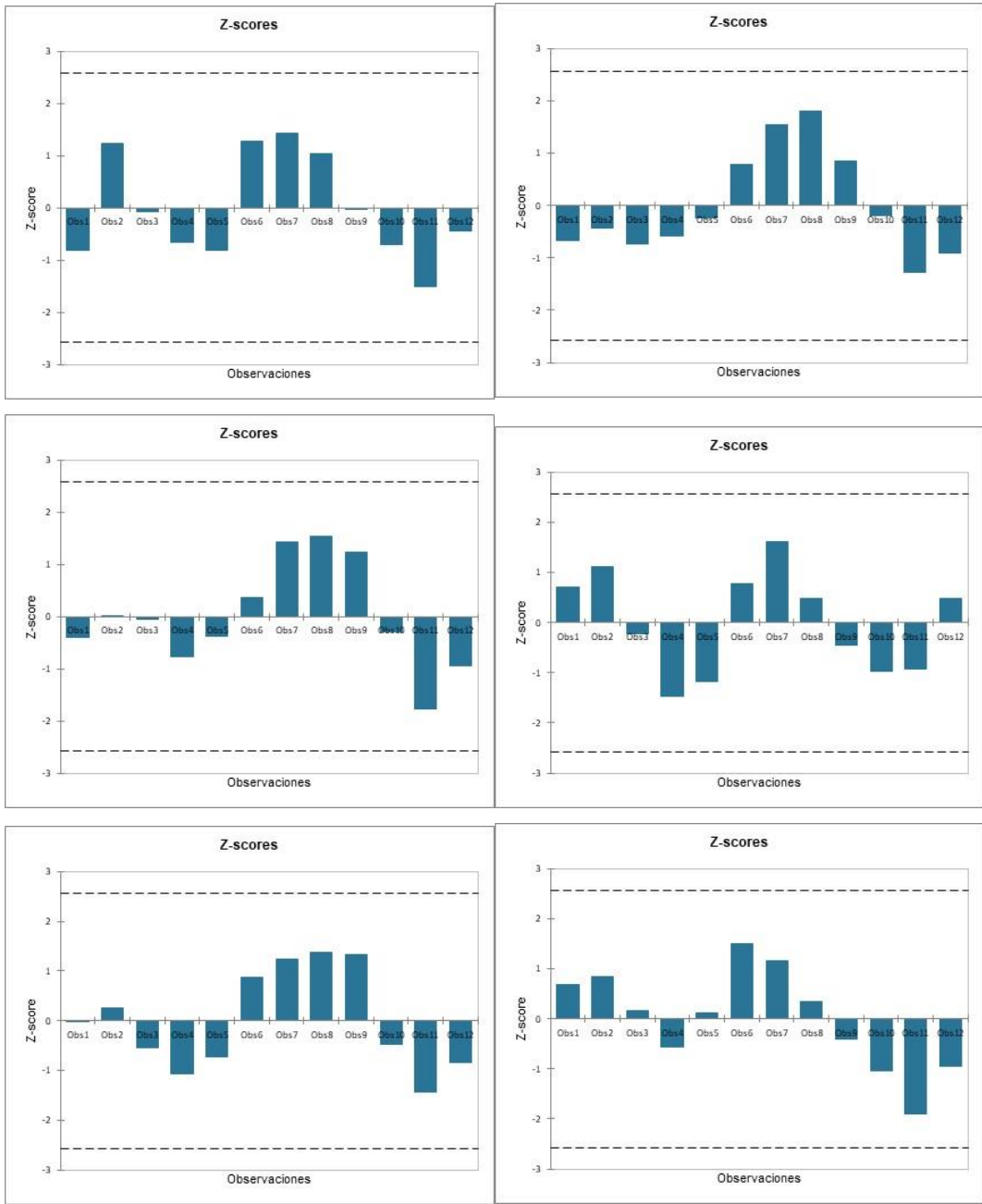


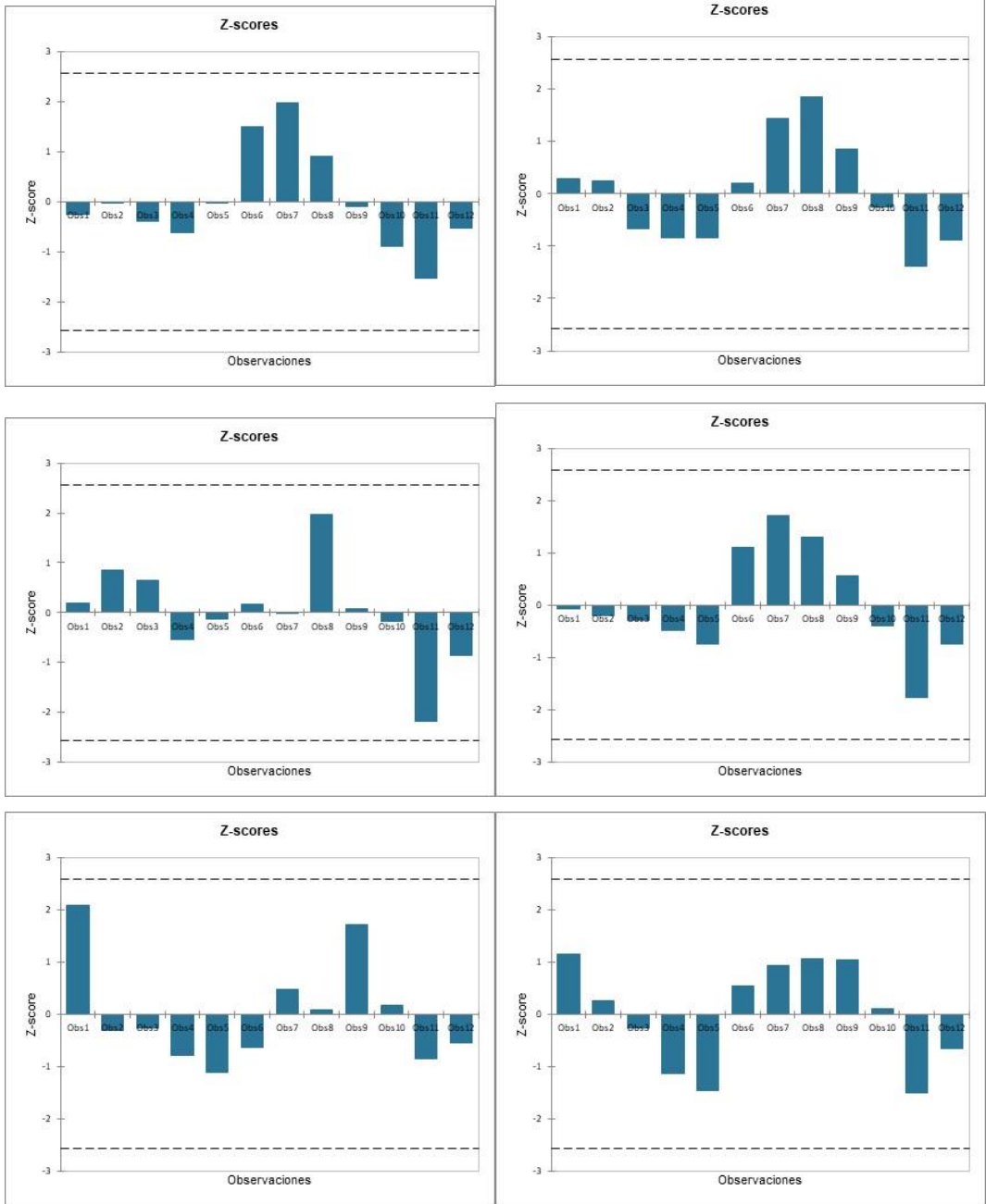


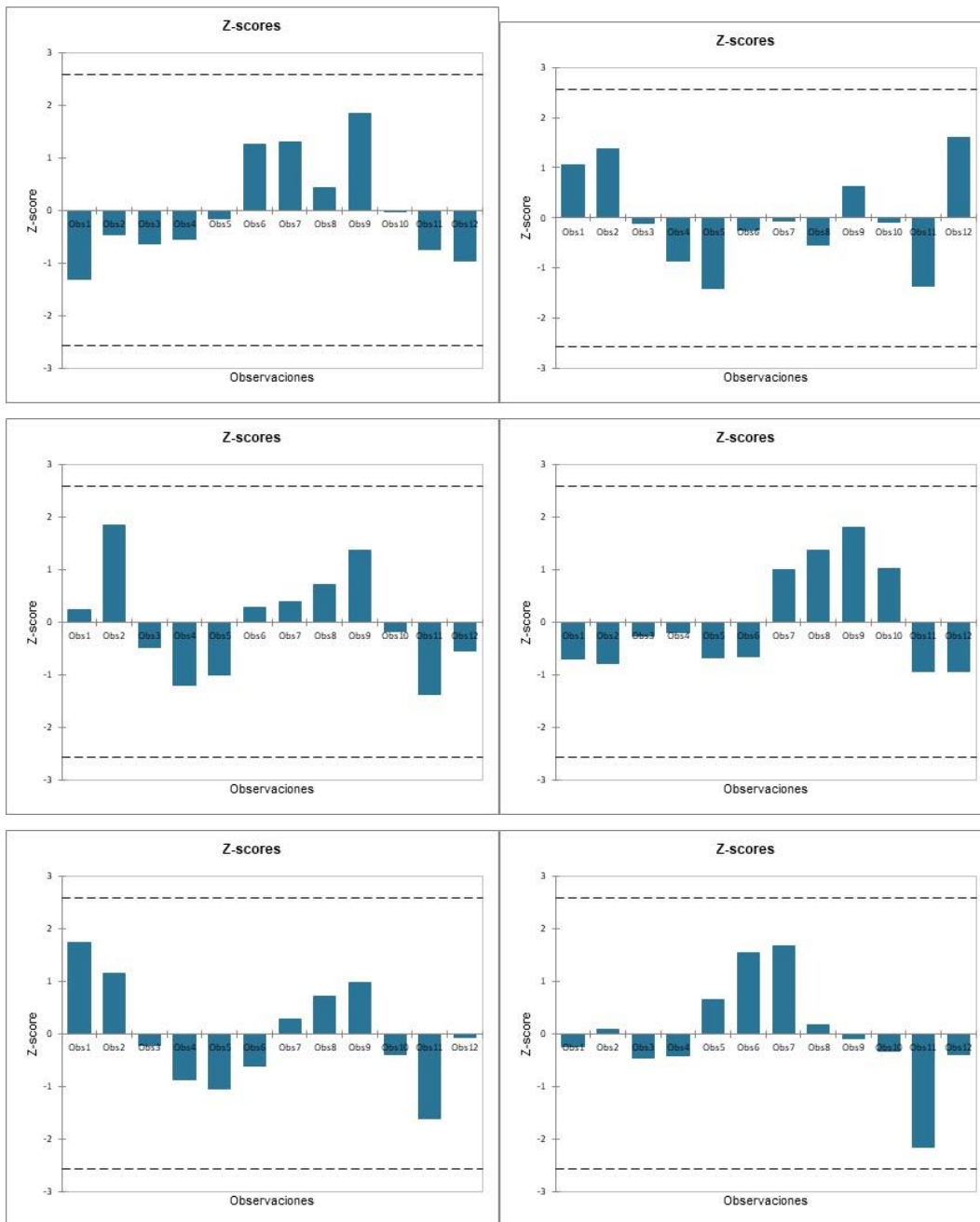


Gráfica 9-34 Valores de velocidad del viento promedio

Fuente: Autor, 2023.

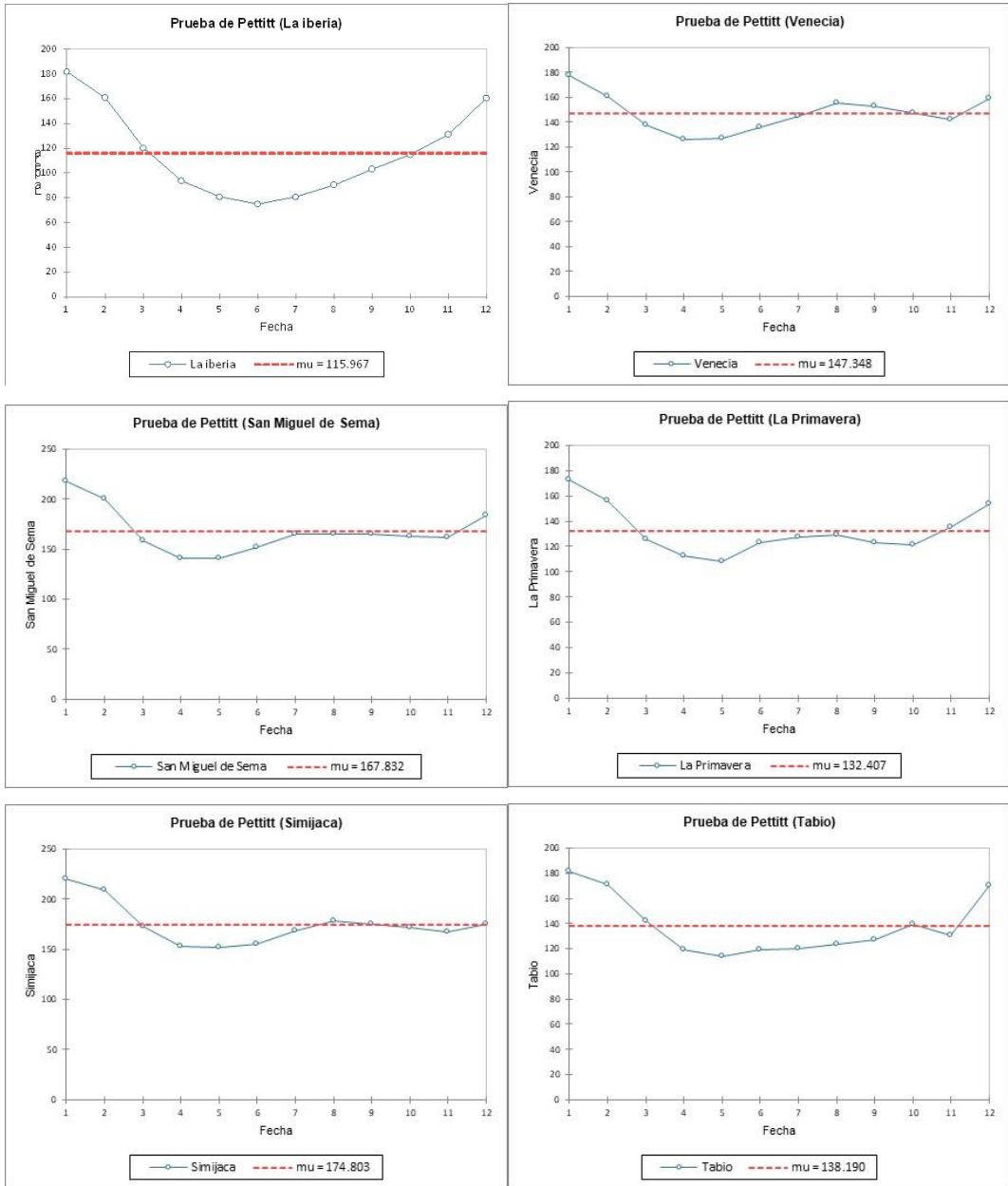


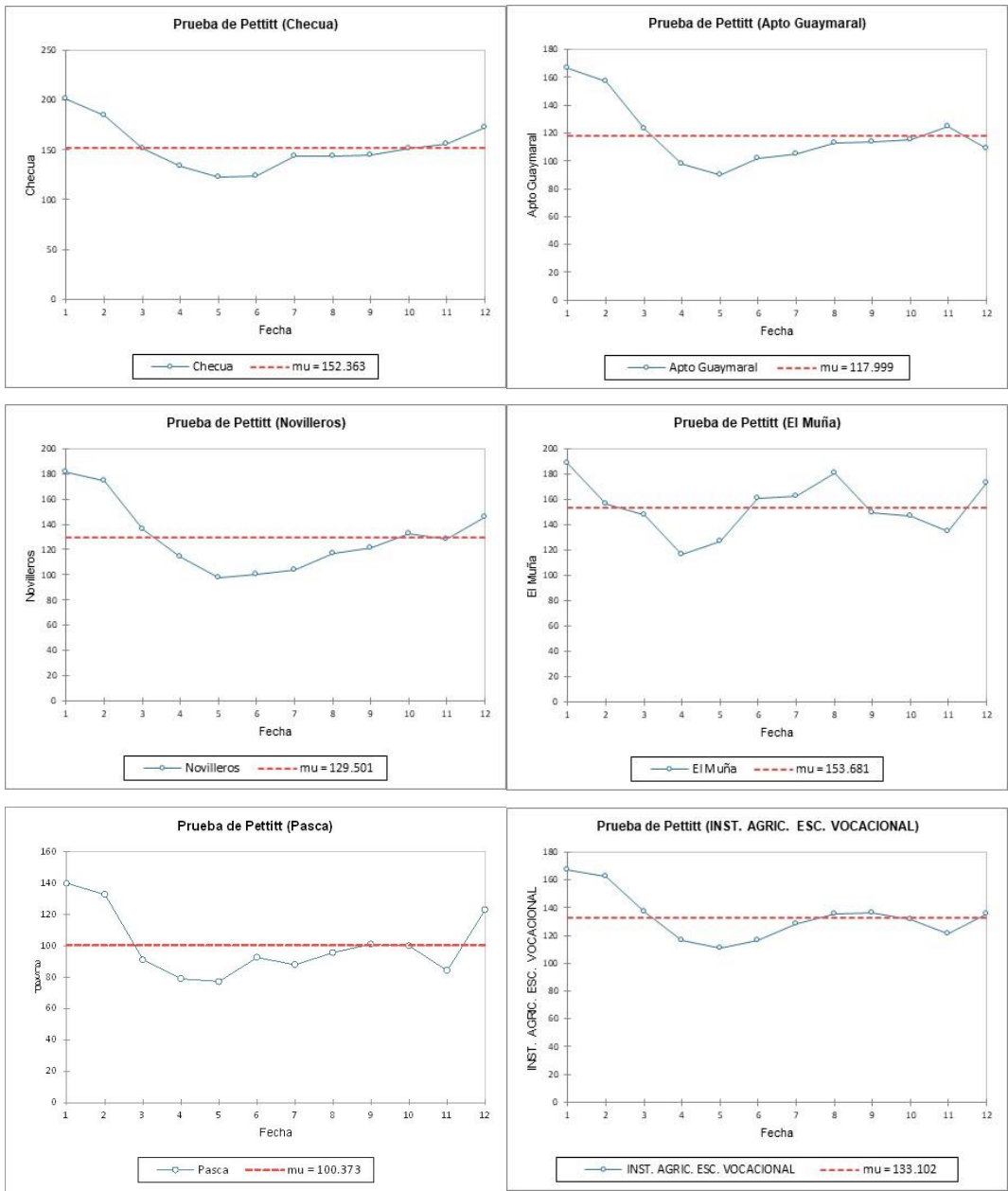


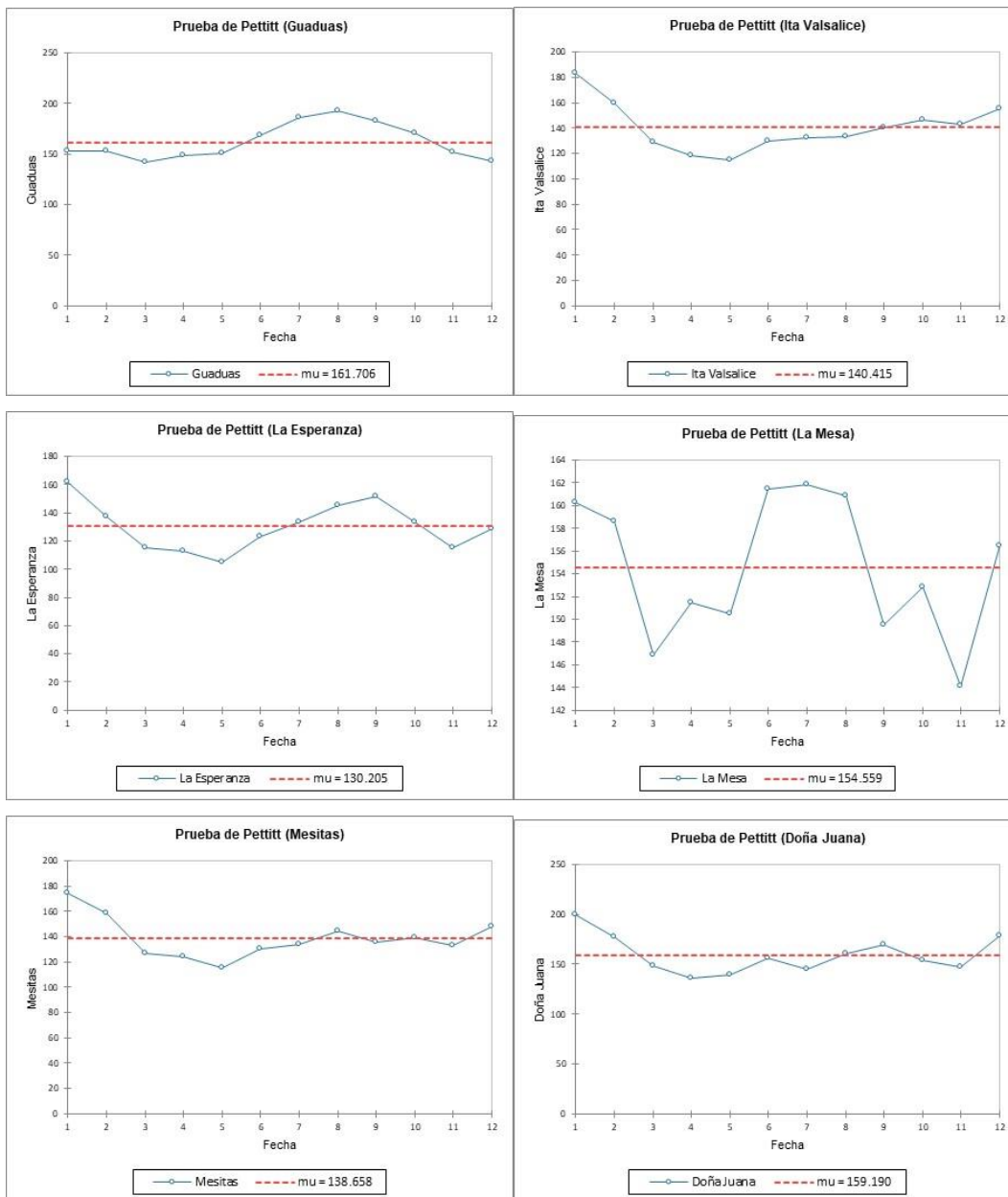


Gráfica 9-35 Prueba de Grubbs de las series de velocidad del viento empleadas para el cálculo de la ETo

Fuente: Autor, 2023.

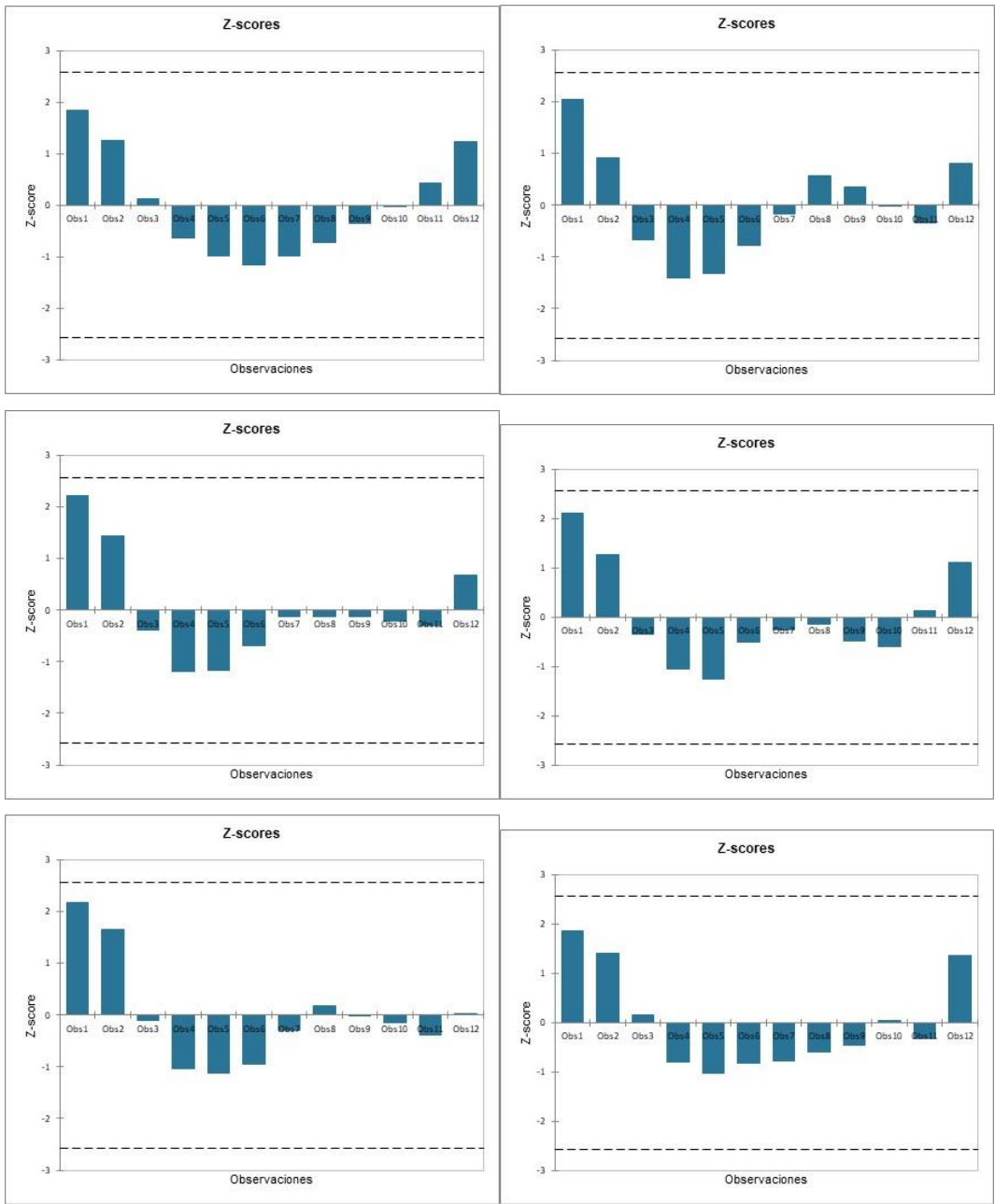


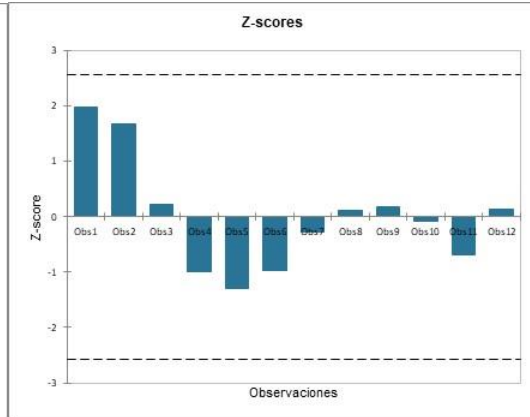
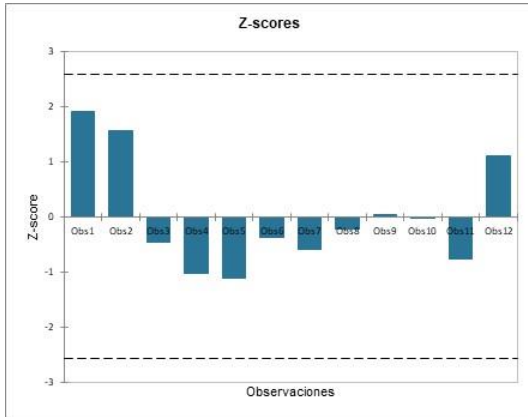
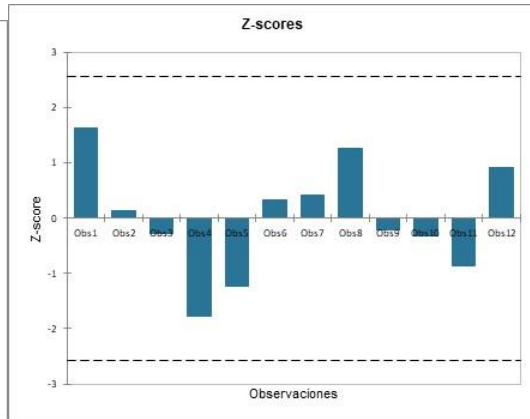
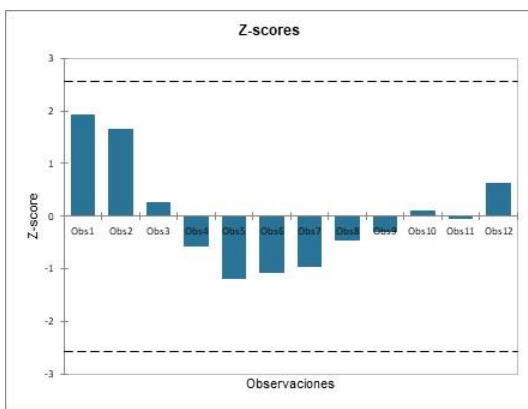
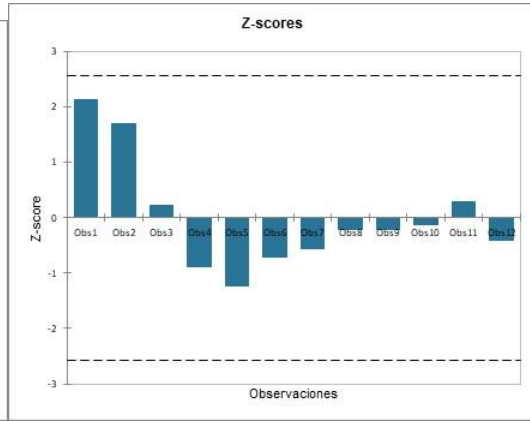
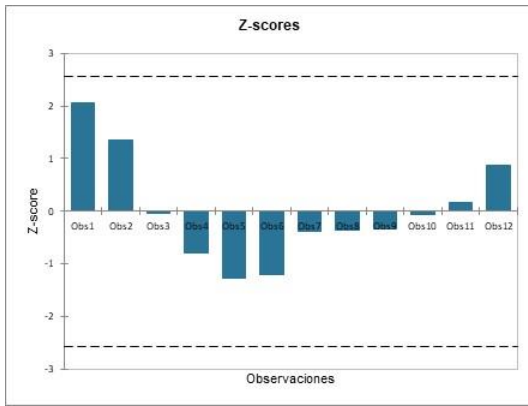


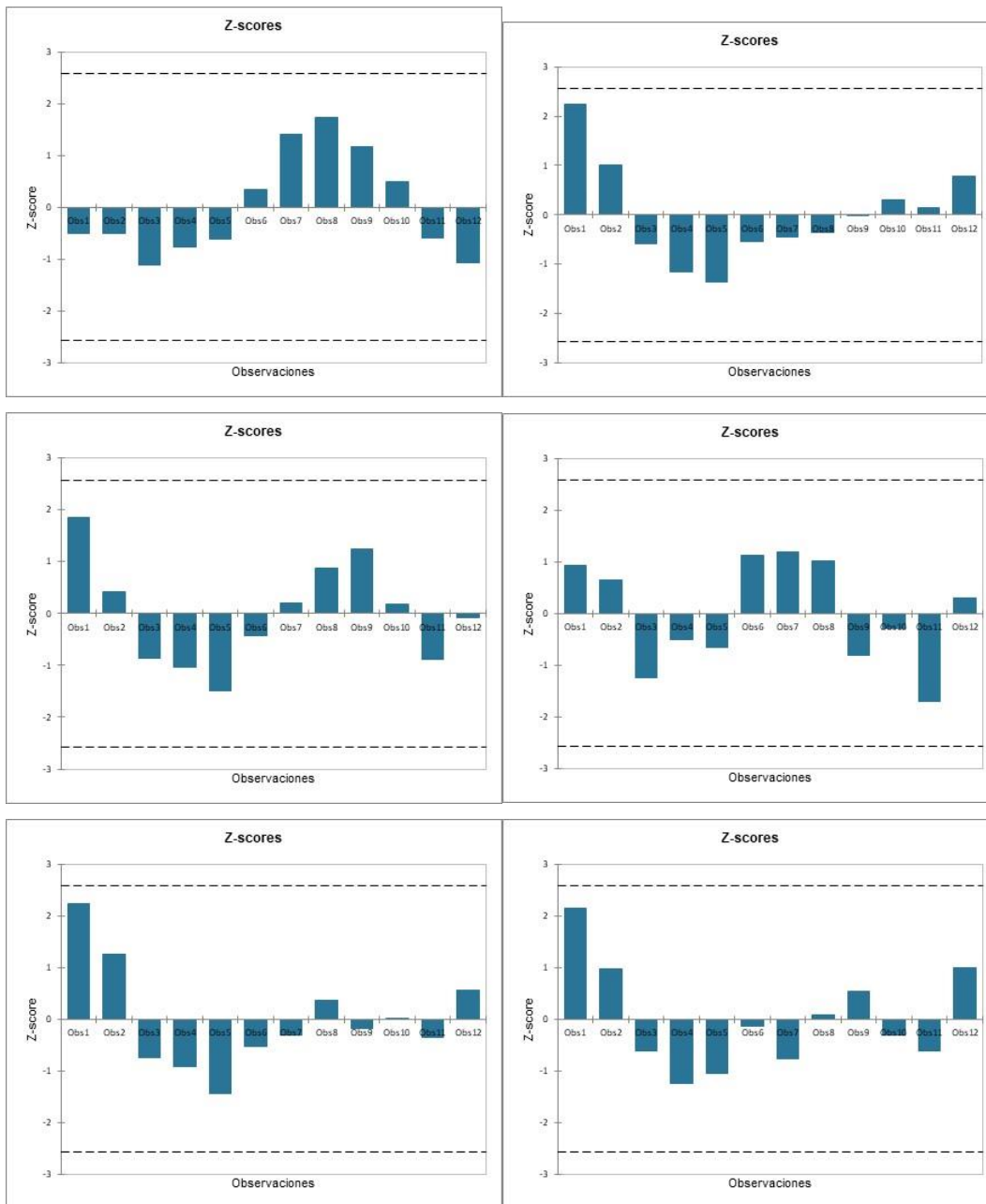


Gráfica 9-36 Valores de brillo solar promedio

Fuente: Autor, 2023.



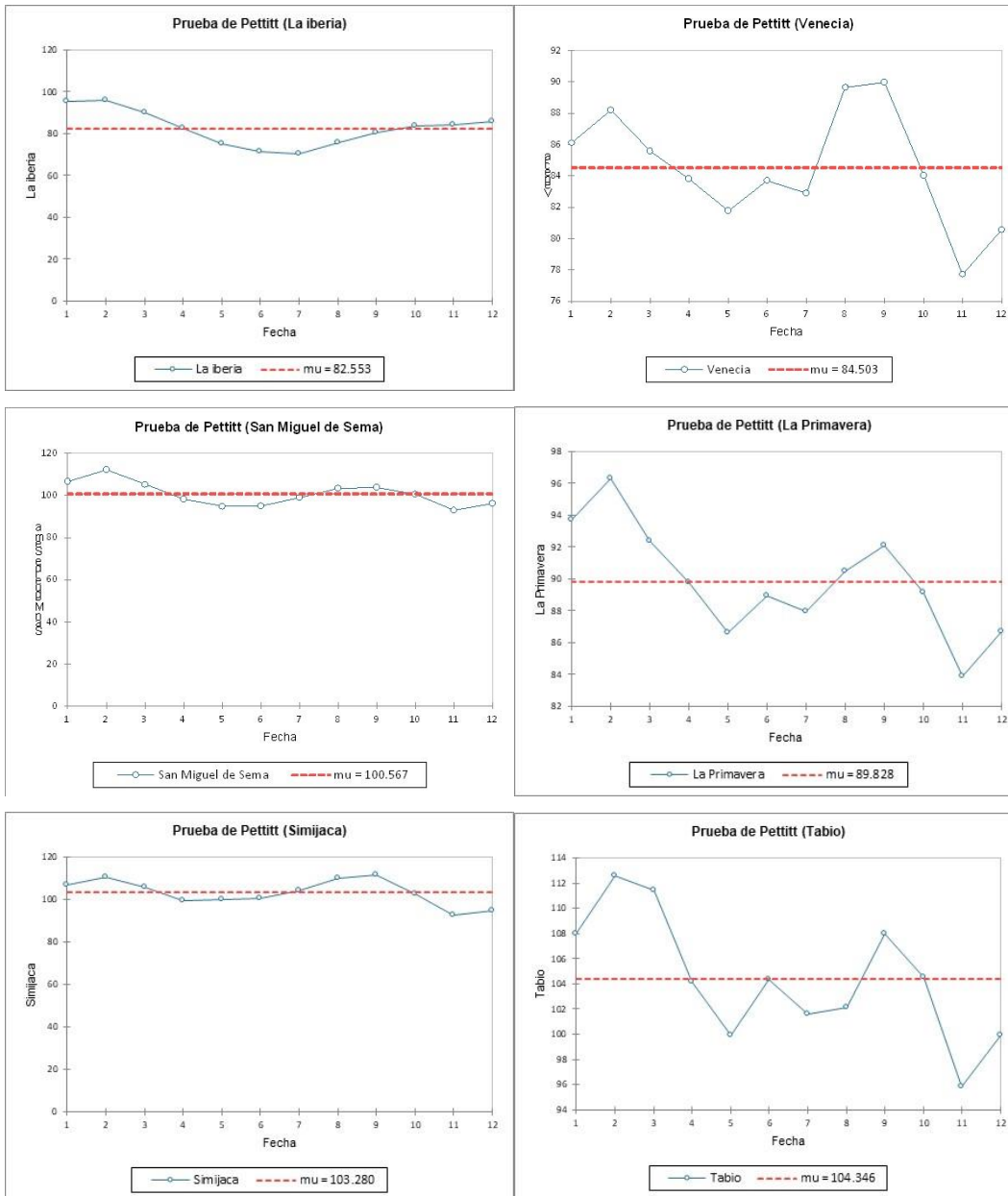


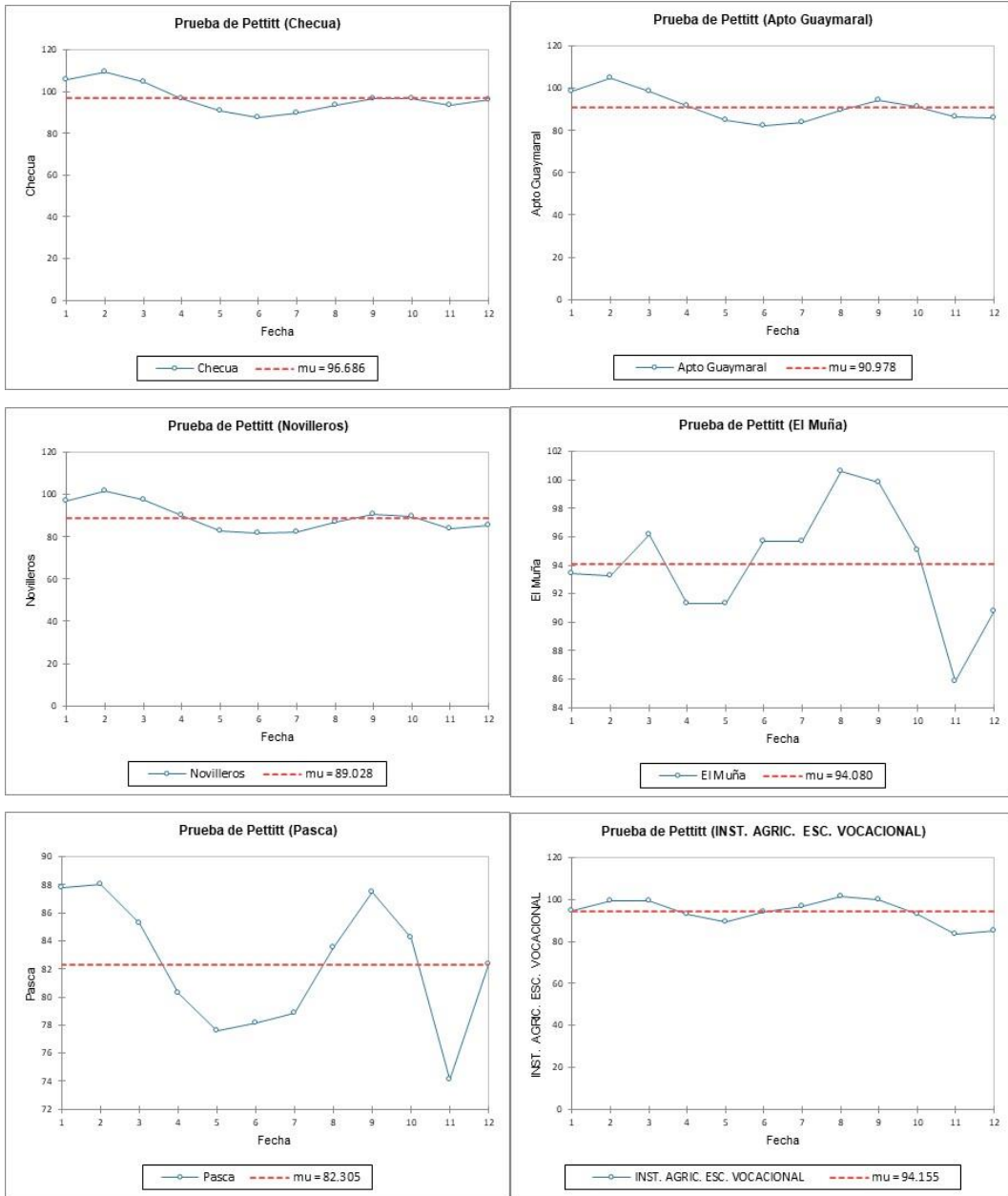


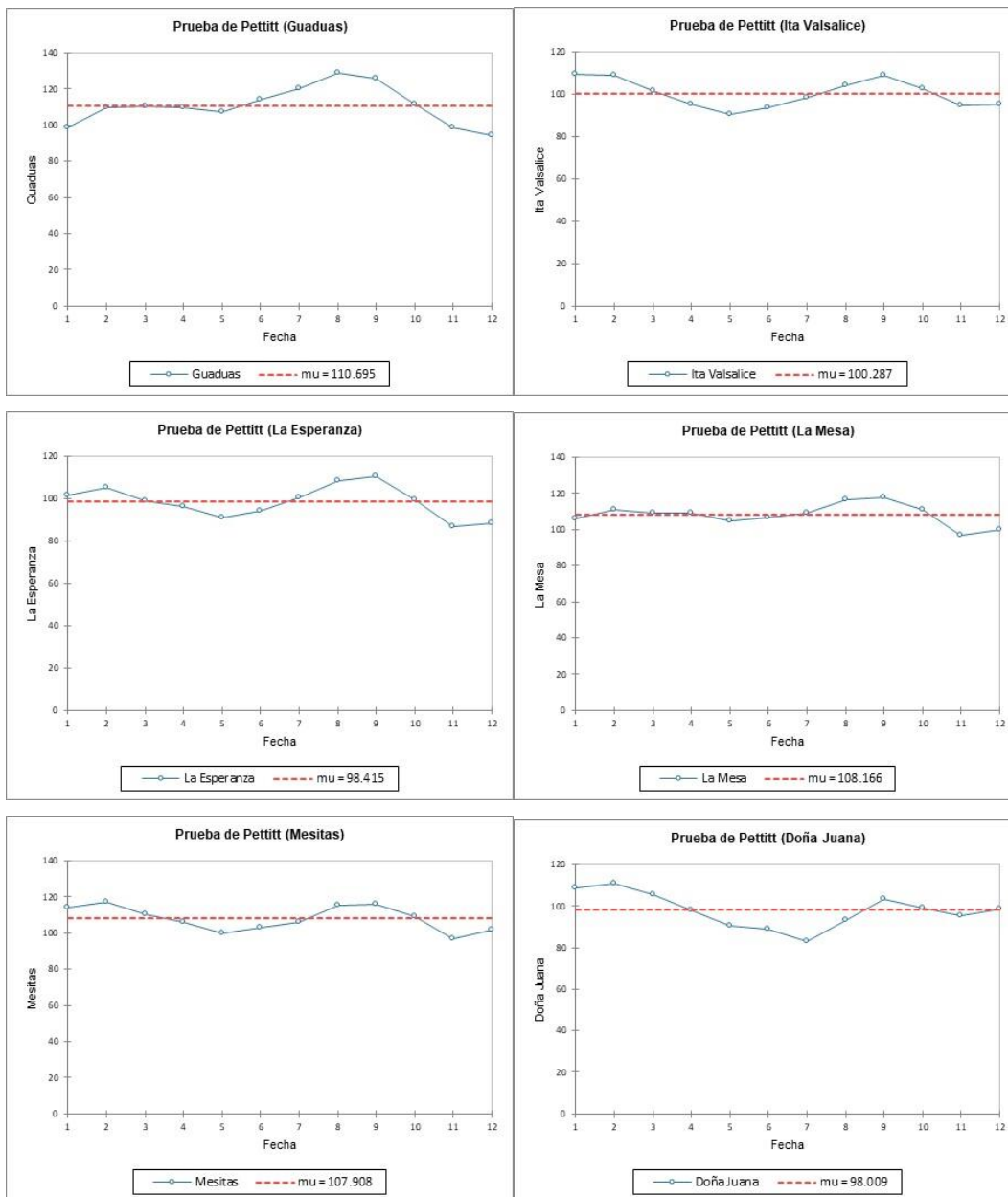
Gráfica 9-37 Prueba de Grubbs de las series de brillo solar empleadas para el cálculo de la ETo en el departamento de Cundinamarca

Fuente: Autor, 2023.

9.4.2 Evapotranspiración de referencia ETo

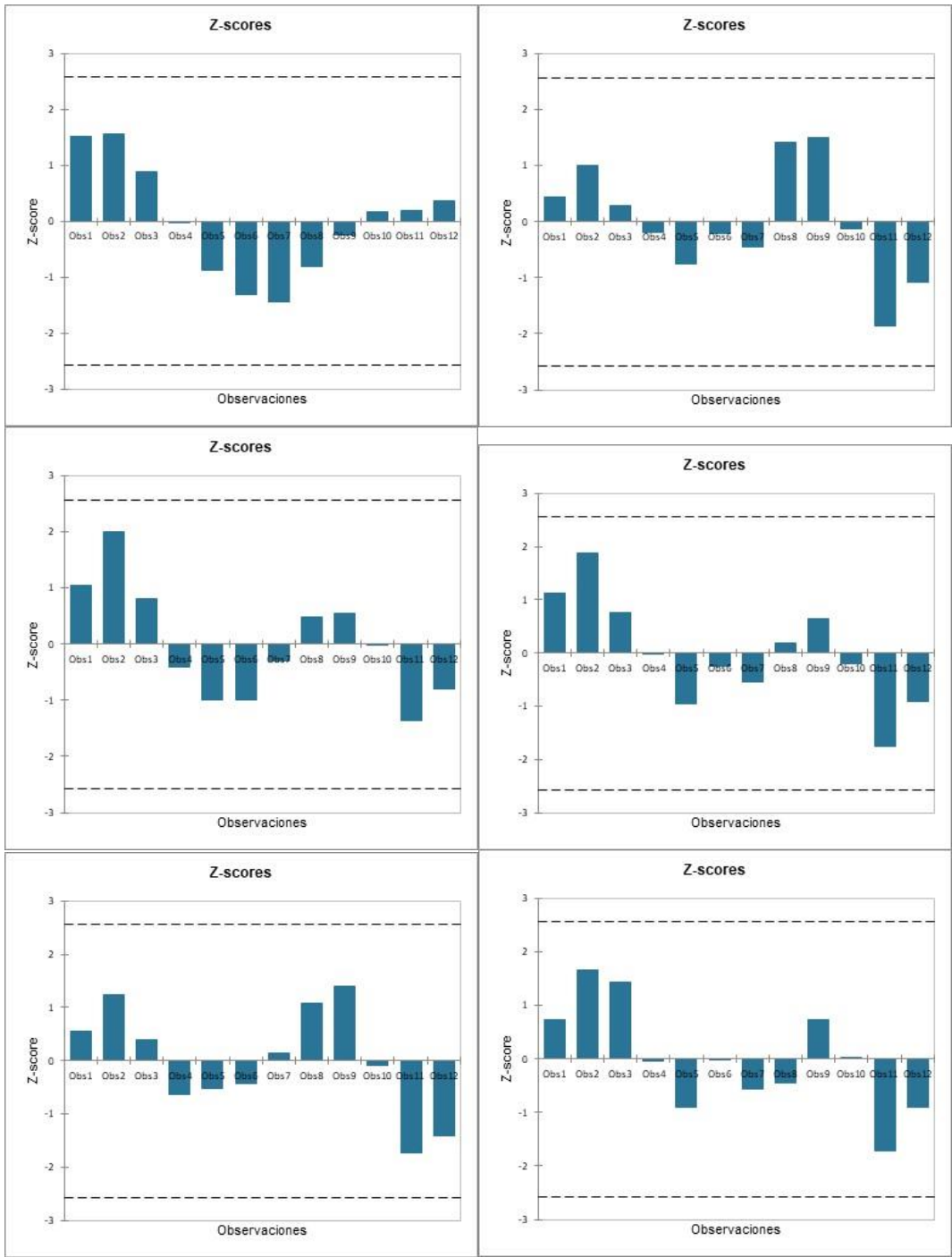


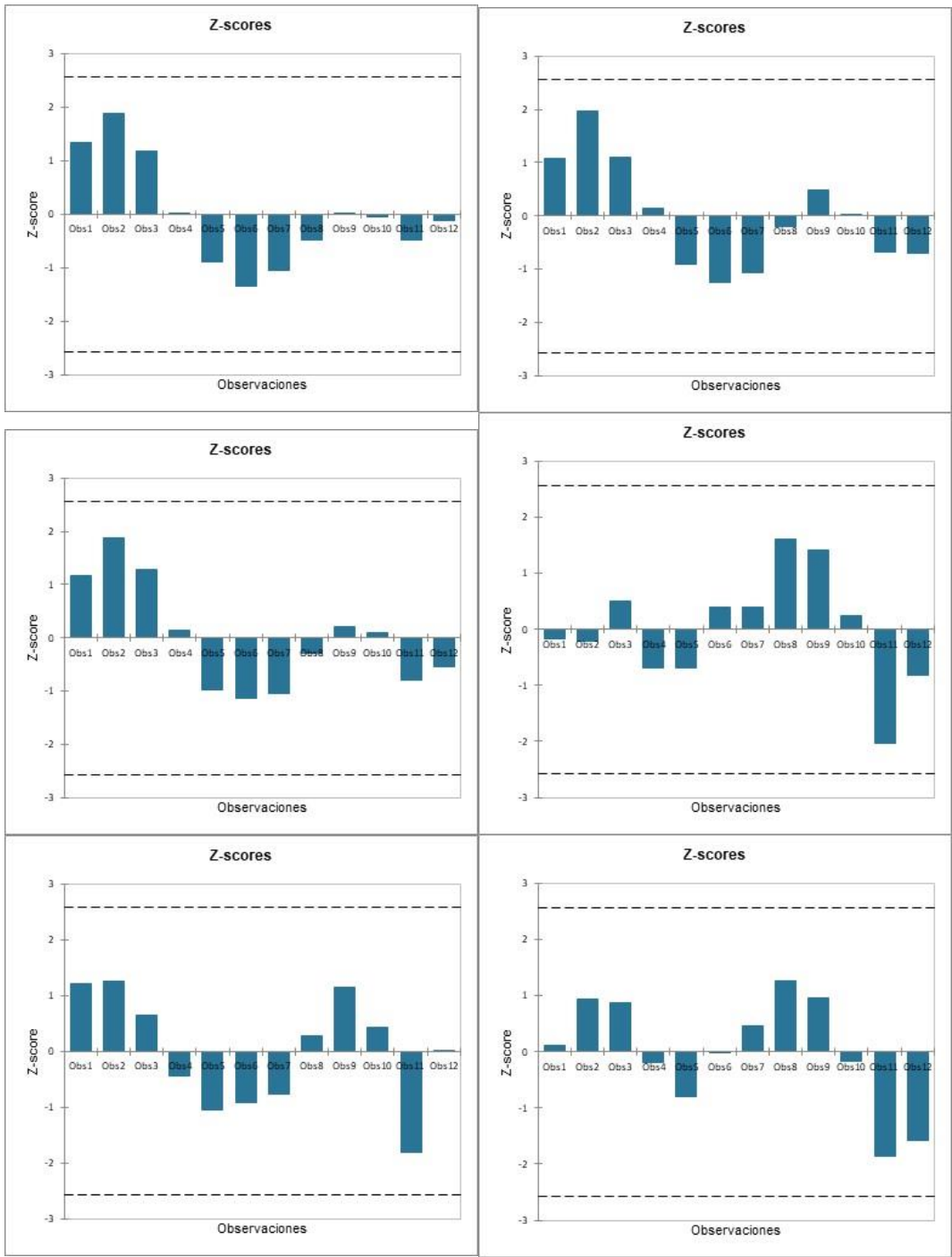


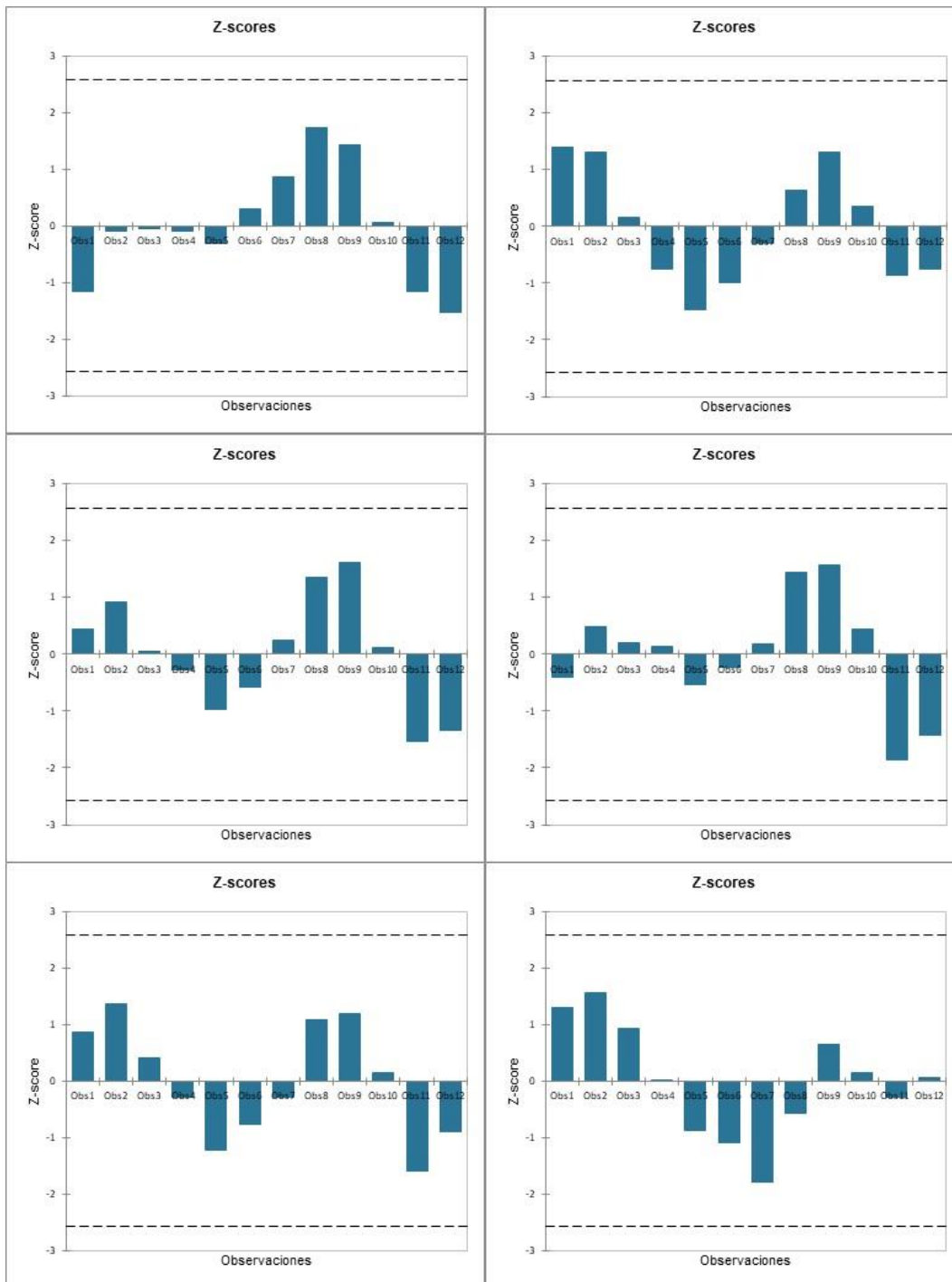


Gráfica 9-38 Valores de ETo promedio totales mensuales

Fuente: Autor, 2023.

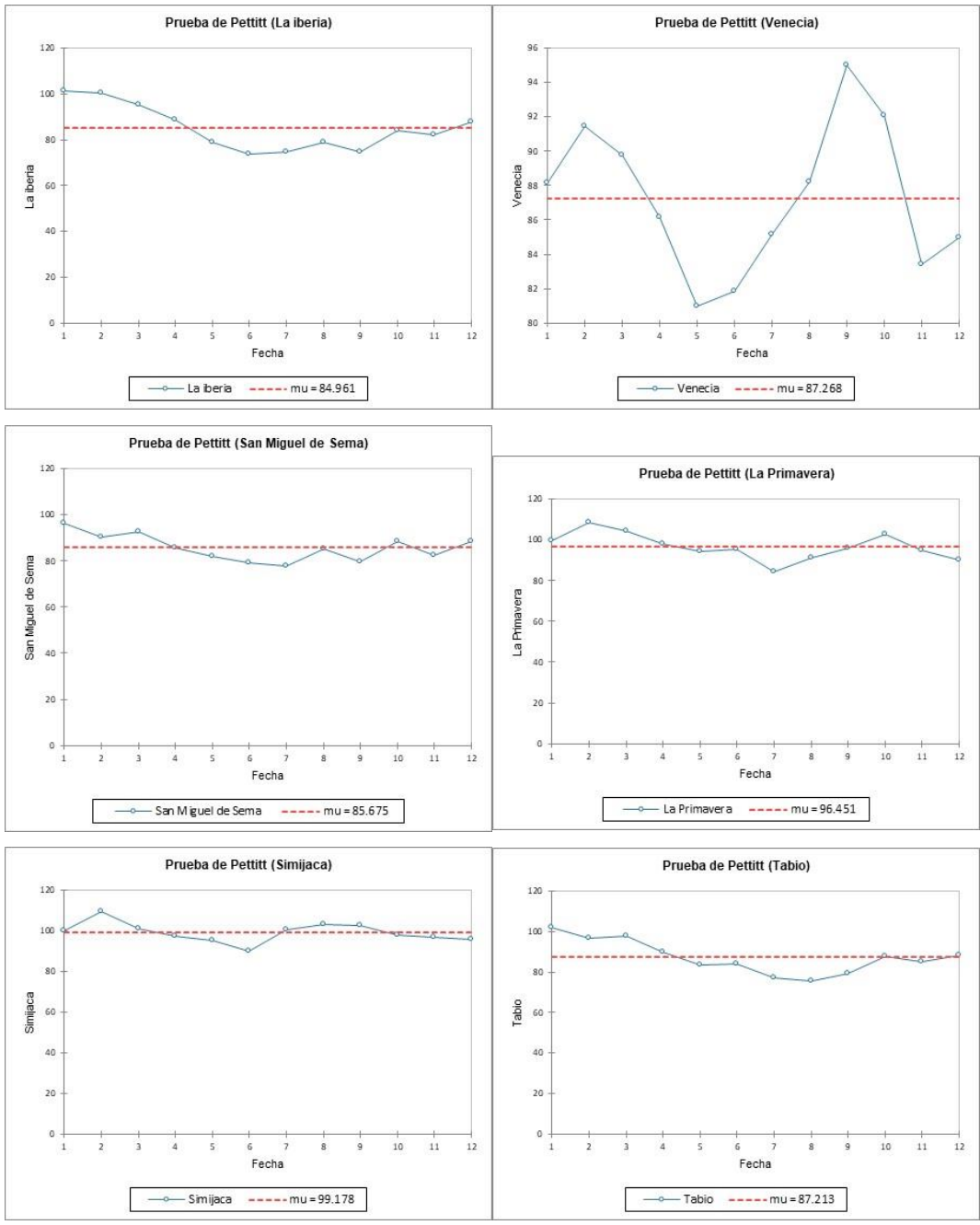


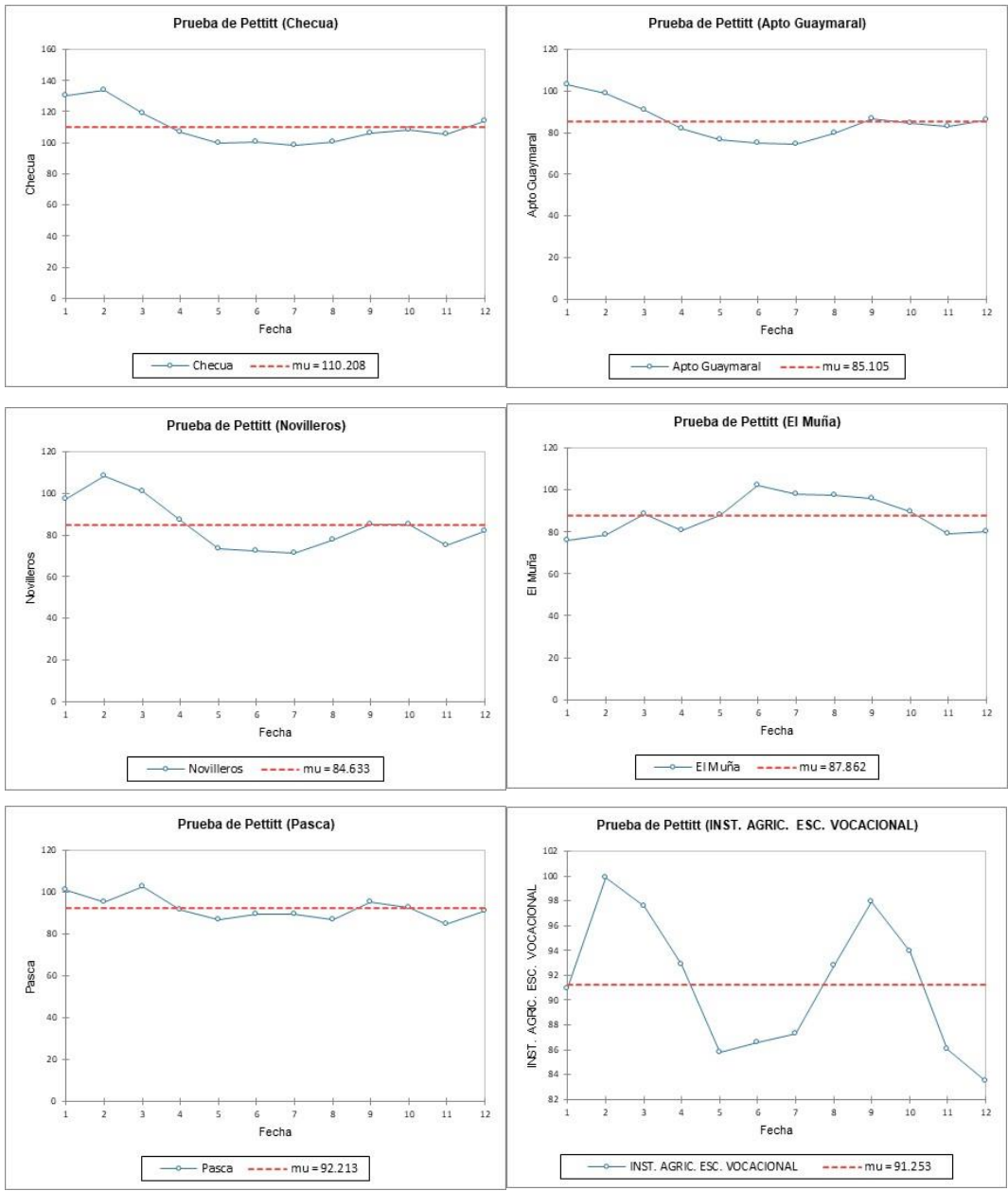


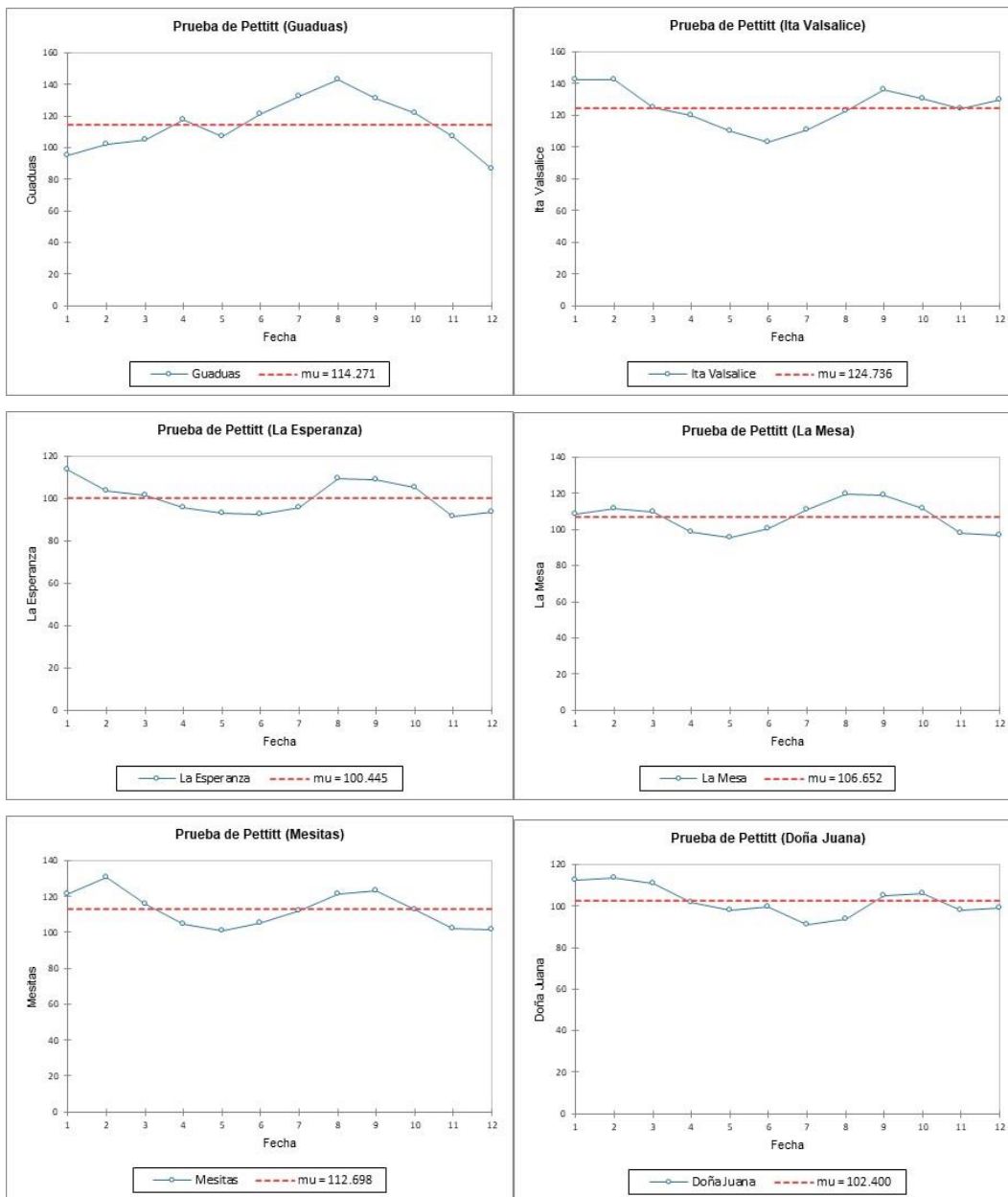


Gráfica 9-39 Prueba de Grubbs de las series de ETo obtenidas

Fuente: Autor, 2023.

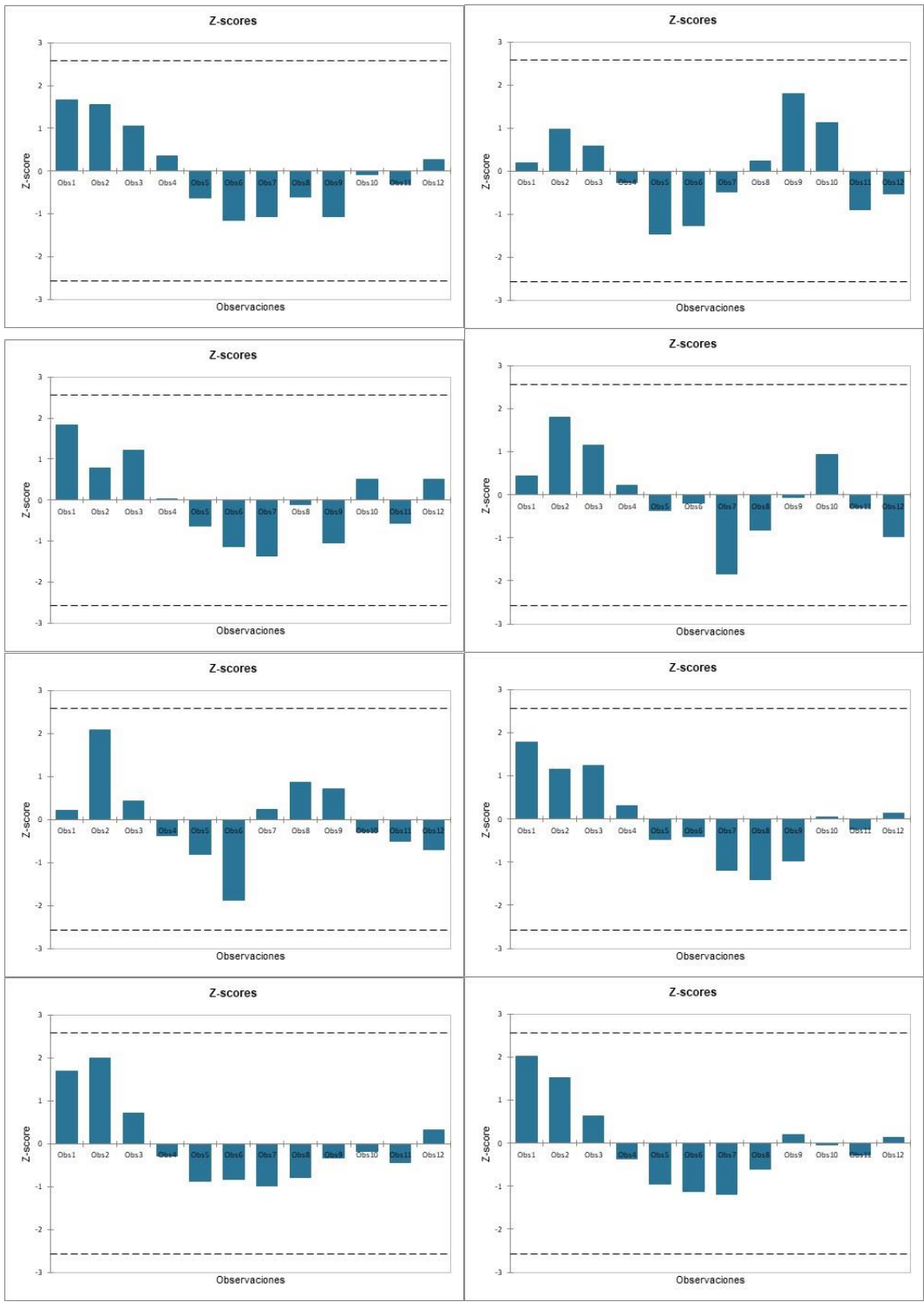


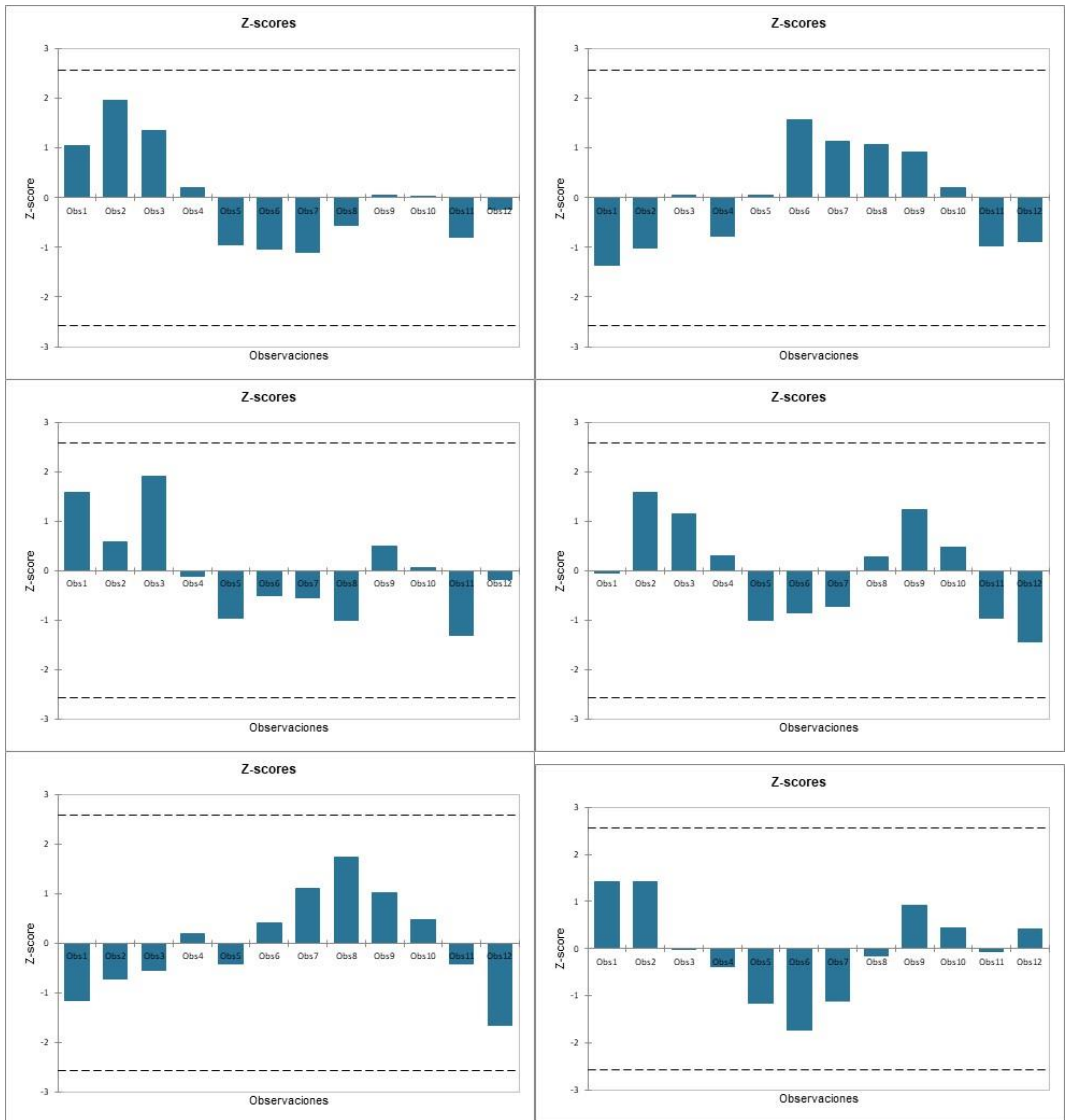


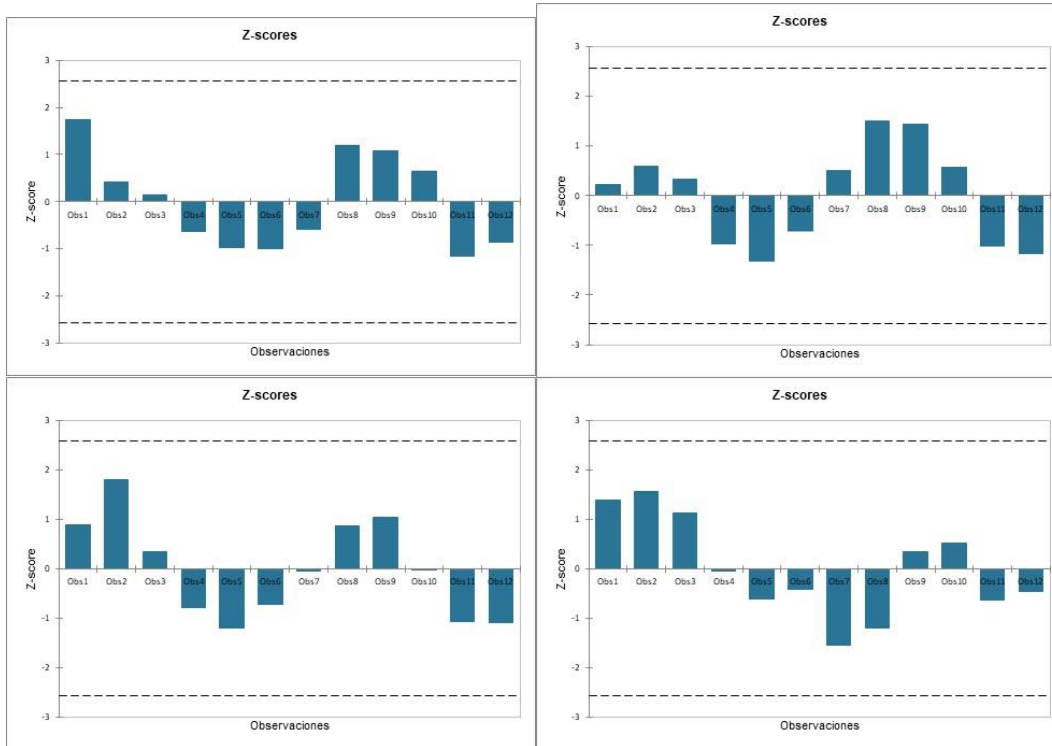


Gráfica 9-40 Valores de evaporación promedio totales mensuales

Fuente: Autor, 2023.







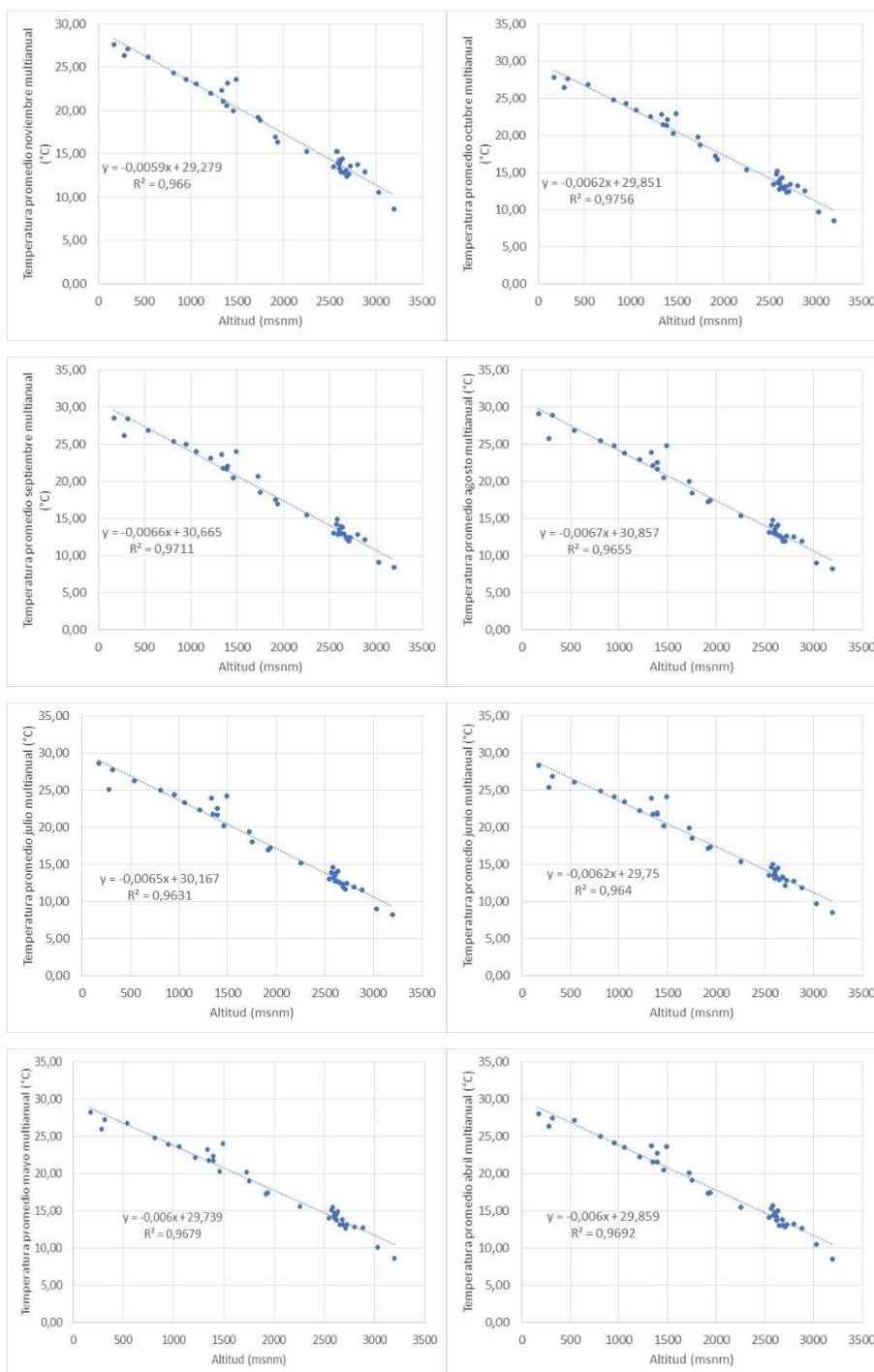
Gráfica 9-41 Prueba de Grubbs de las series de evaporación

Fuente: Autor, 2023.

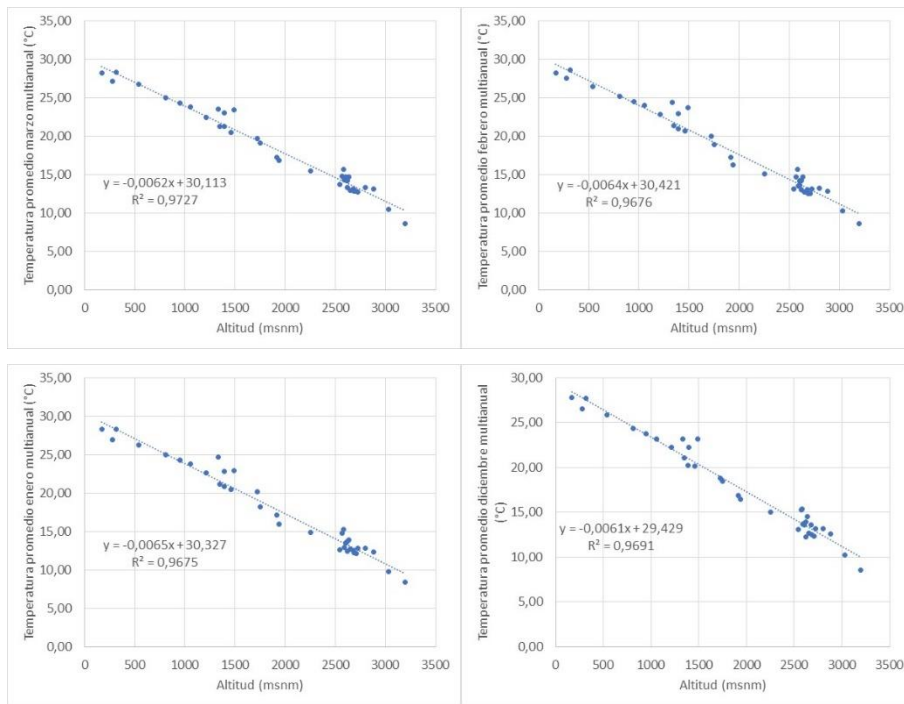
9.5 Anexo 5. Memorias del cálculo de la ETo

9.6 Anexo 6. Relación entre evaporación y ETo

9.7 Anexo 7. Modelos de regresión para ajuste de regionalización

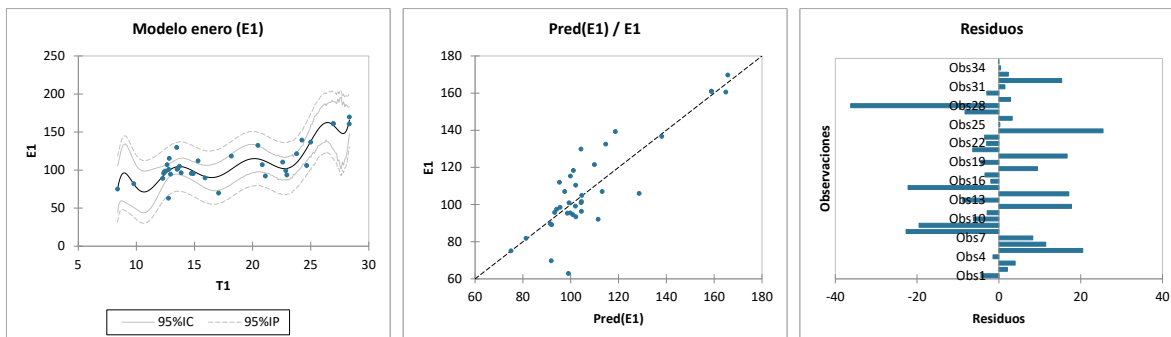


Gráfica 9 42 Modelo de regresión de temperatura media mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

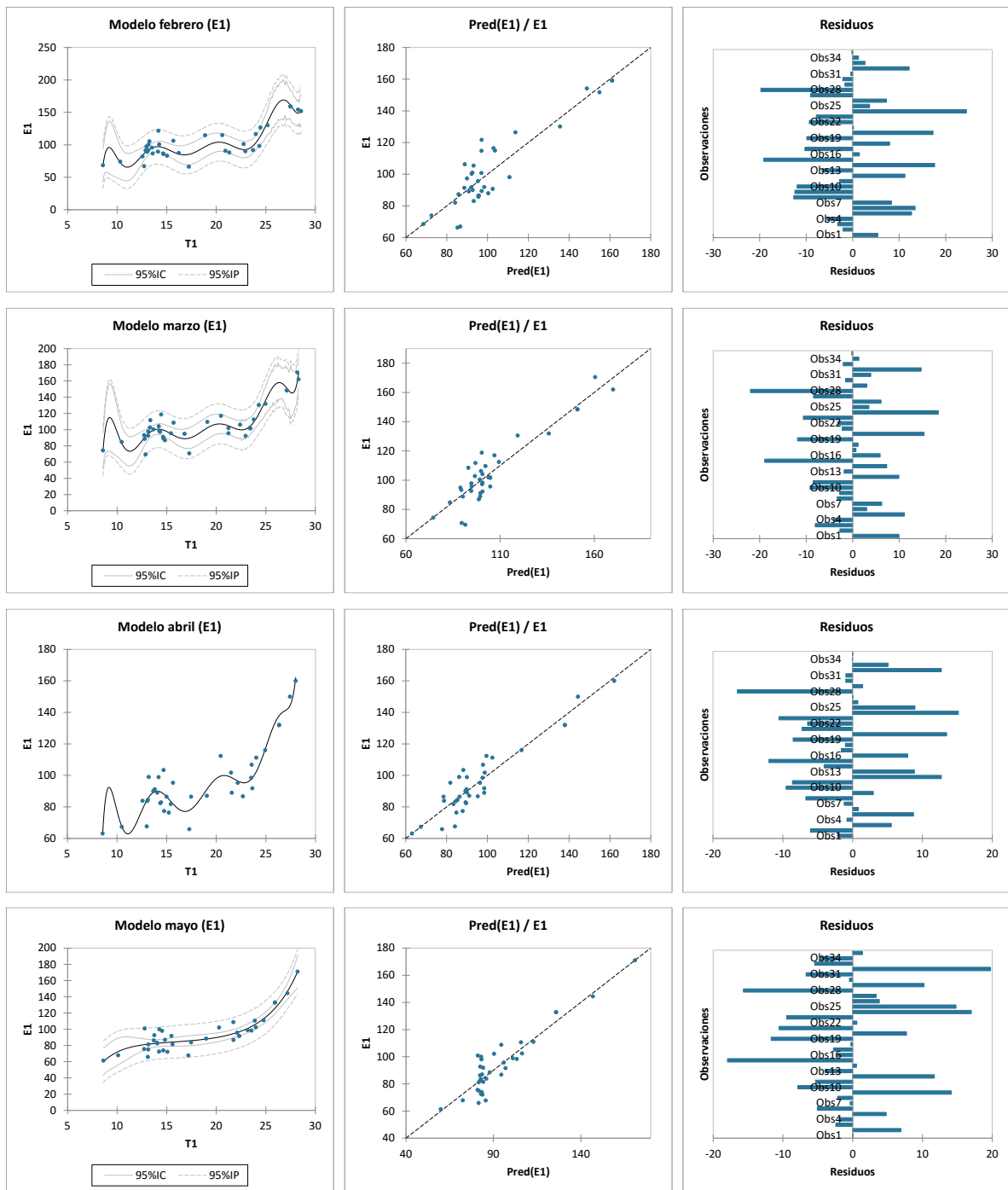


Gráfica 9-42 Modelo de regresión de temperatura media mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

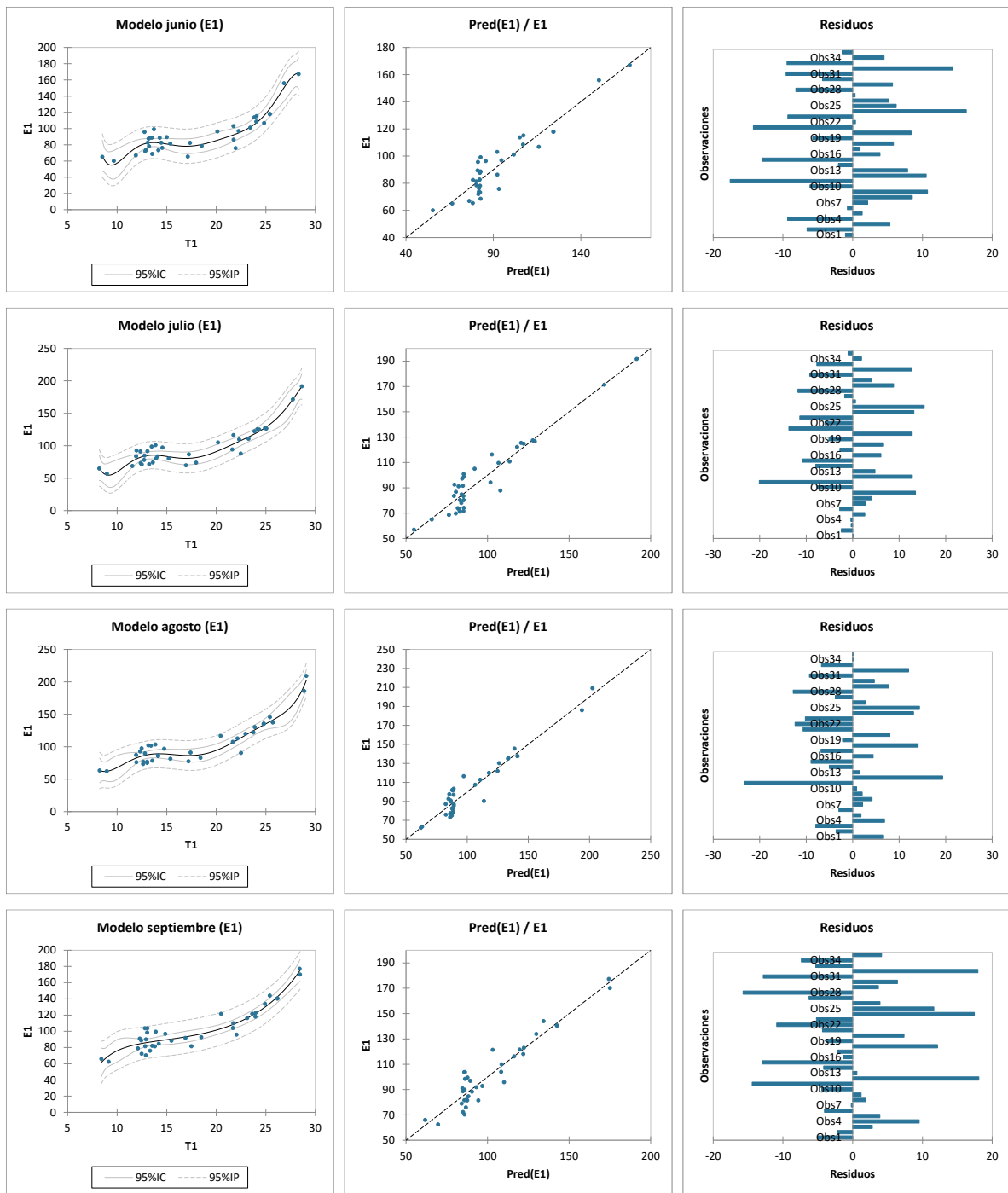
Fuente: Autor, 2023.



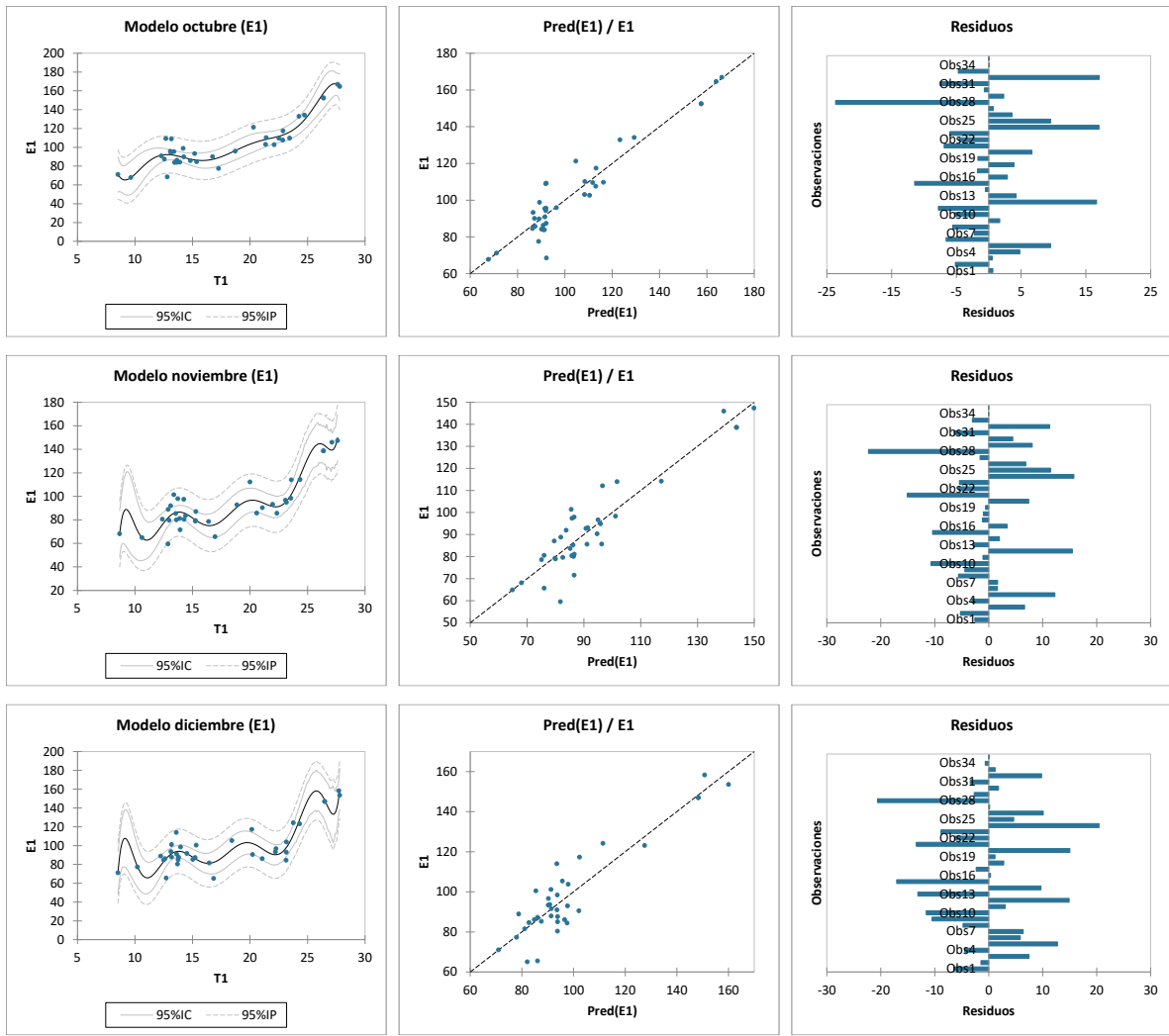
Gráfica 9 43 Resultados de los modelos de regresión de la evaporación media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca



Gráfica 9 43 Resultados de los modelos de regresión de la evaporación media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca



Gráfica 9 43 Resultados de los modelos de regresión de la evaporación media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

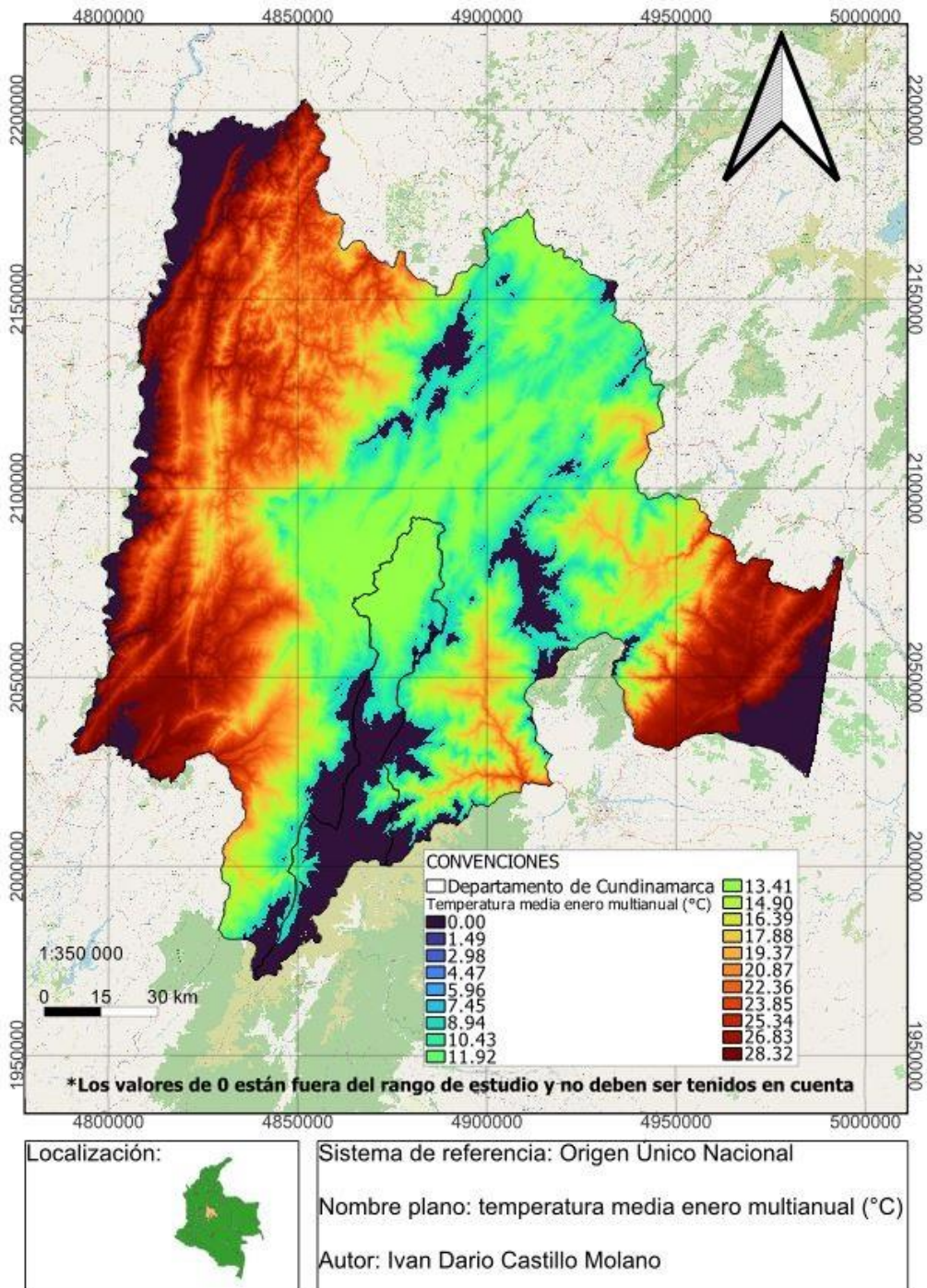


Gráfica 9-43 Resultados de los modelos de regresión de la evaporación media total mensual multianual para el departamento de Cundinamarca

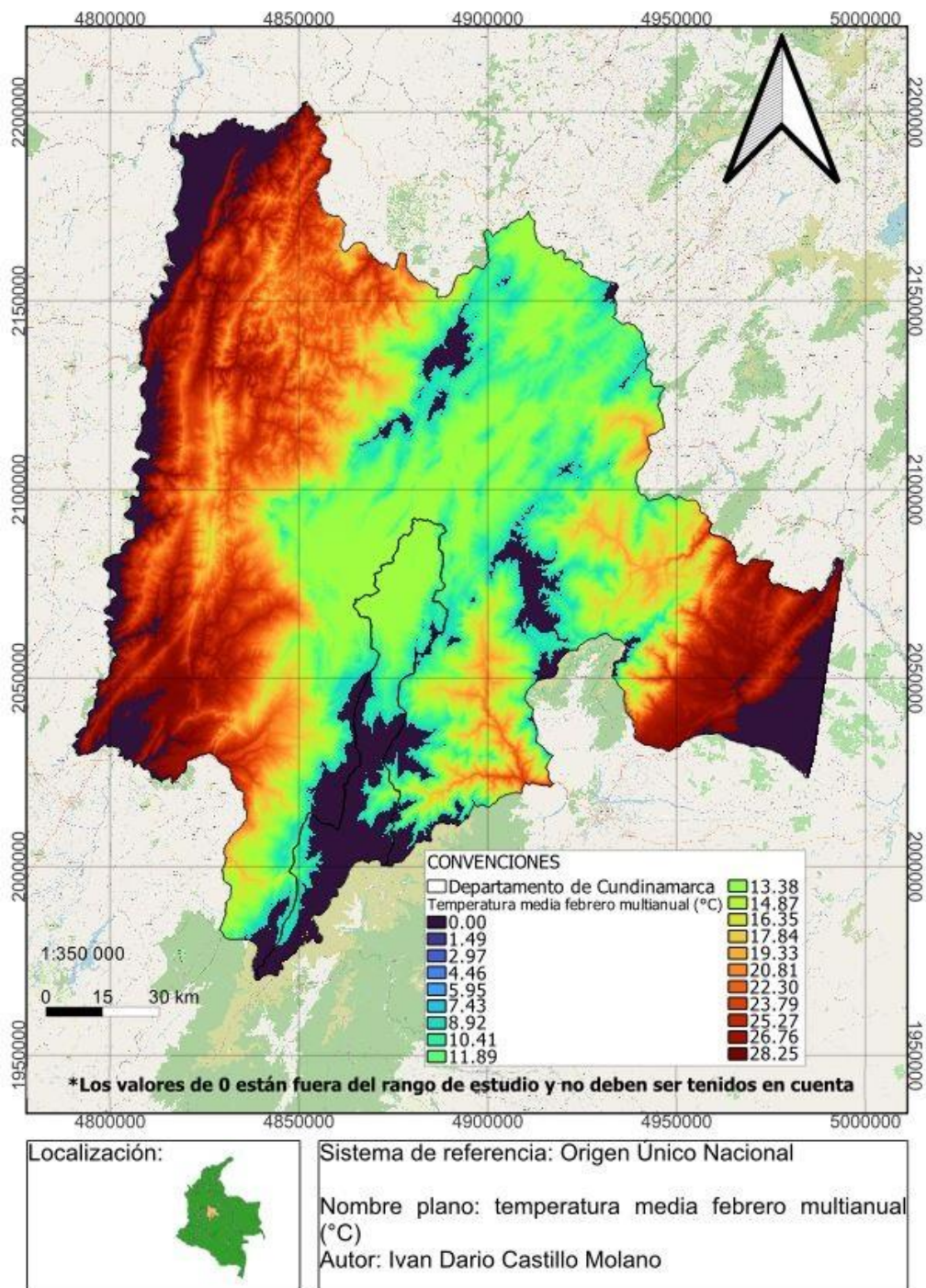
Fuente: Autor, 2023.

9.8 Anexo 8. Mapas de regionalización para el departamento de Cundinamarca

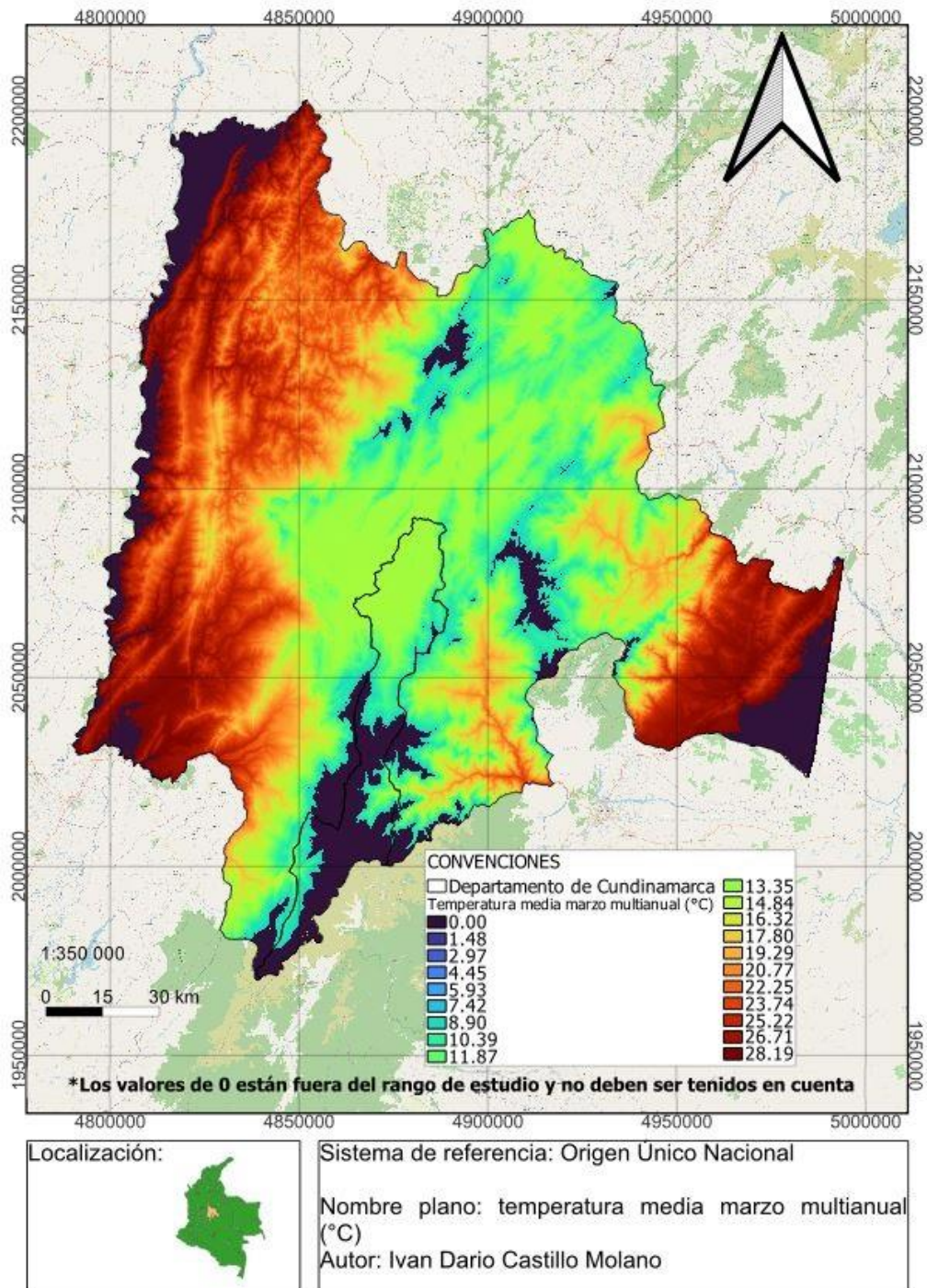
9.8.1 Mapas de temperatura



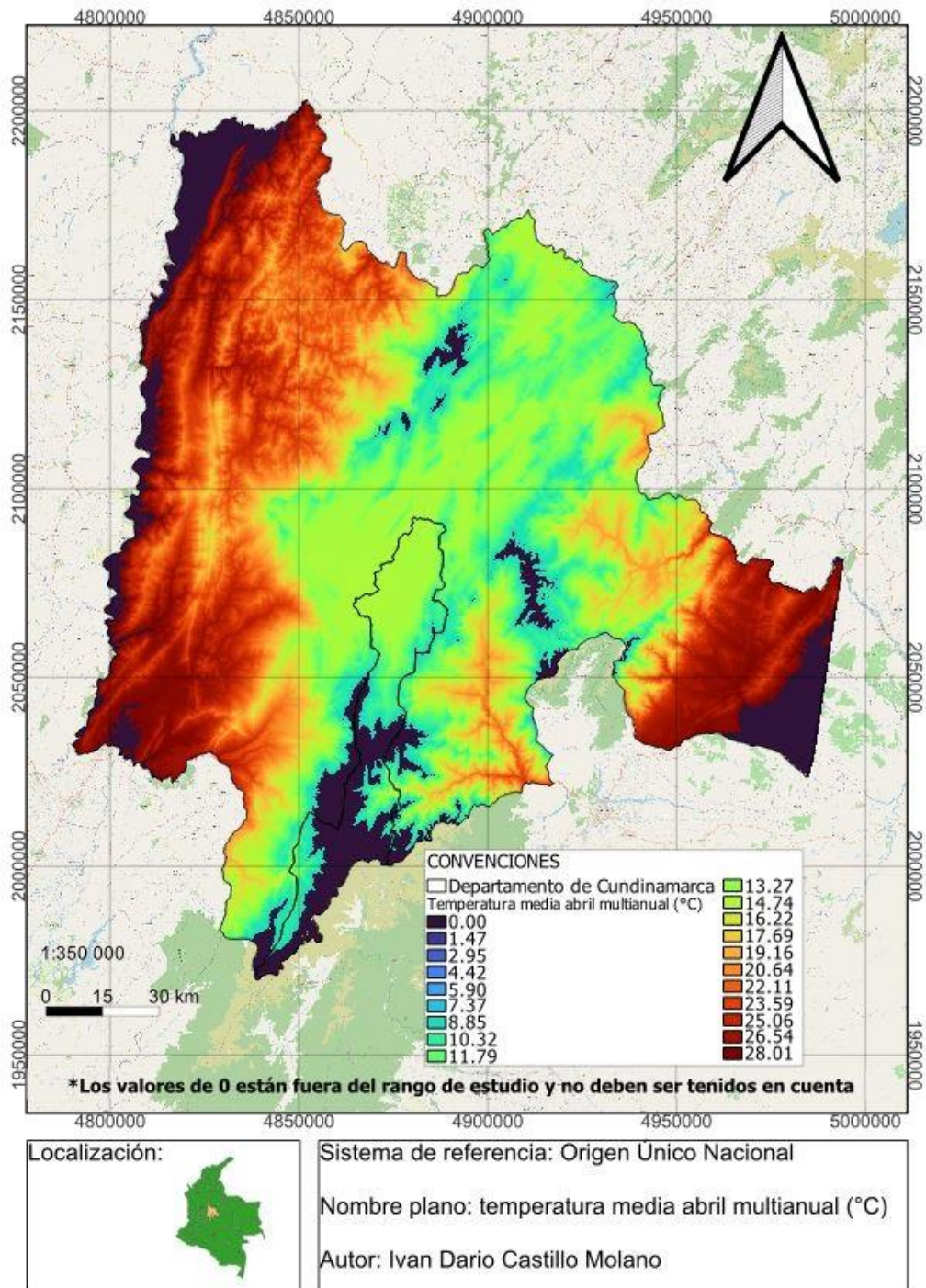
Mapa 1 Temperatura media enero multianual para el departamento de Cundinamarca



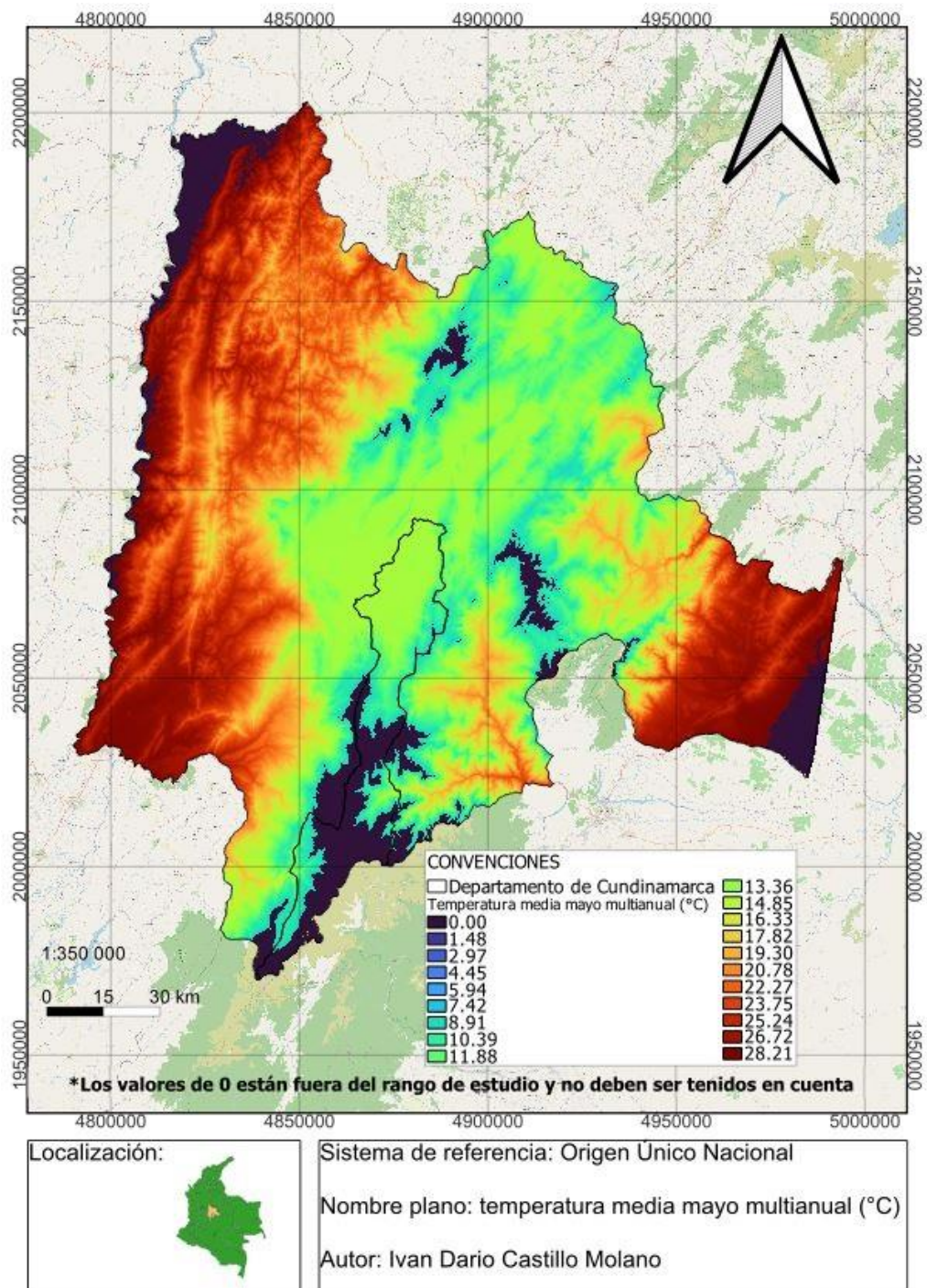
Mapa 2 Temperatura media febrero multianual para el departamento de Cundinamarca



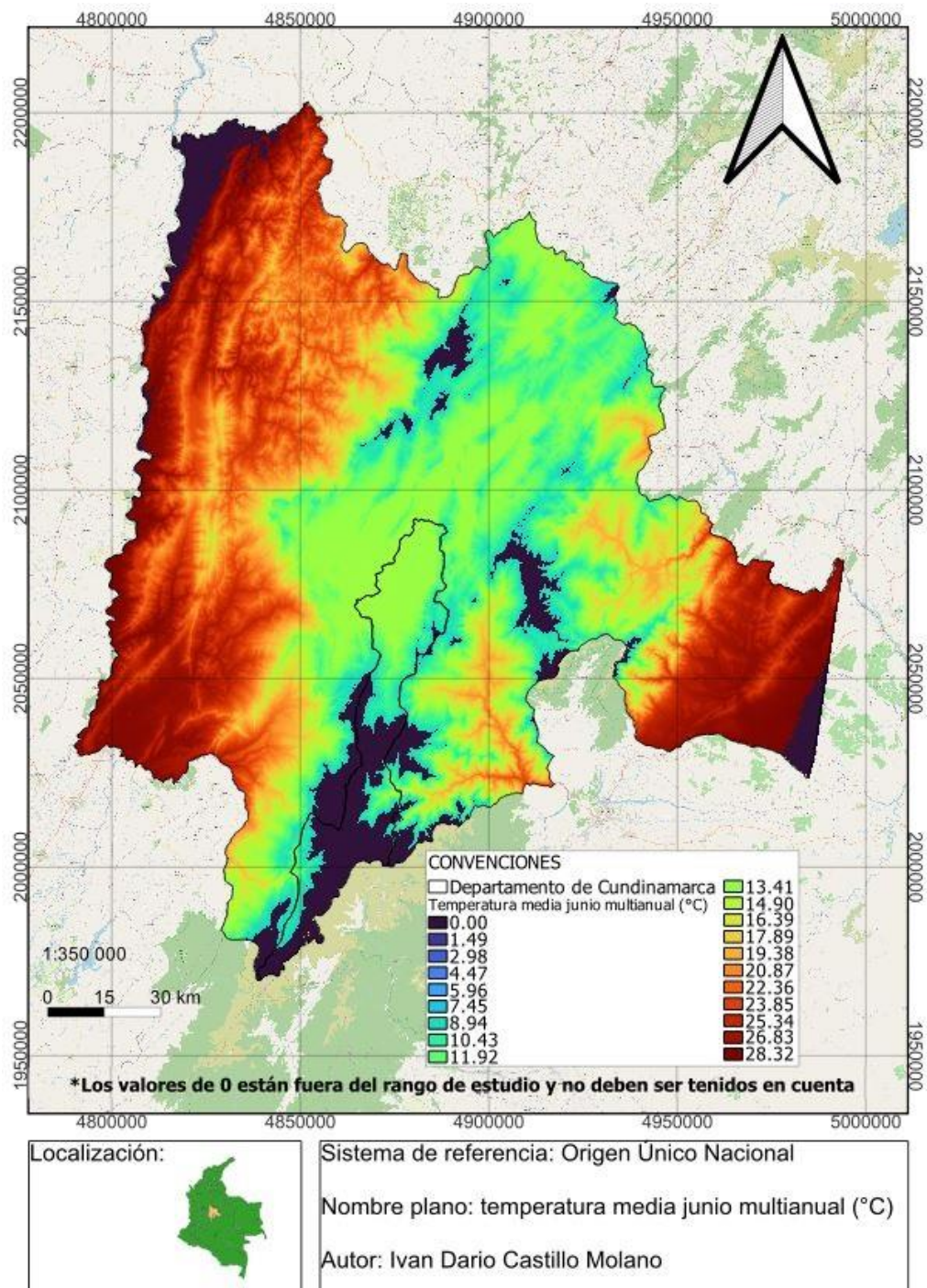
Mapa 3 Temperatura media marzo multianual para el departamento de Cundinamarca



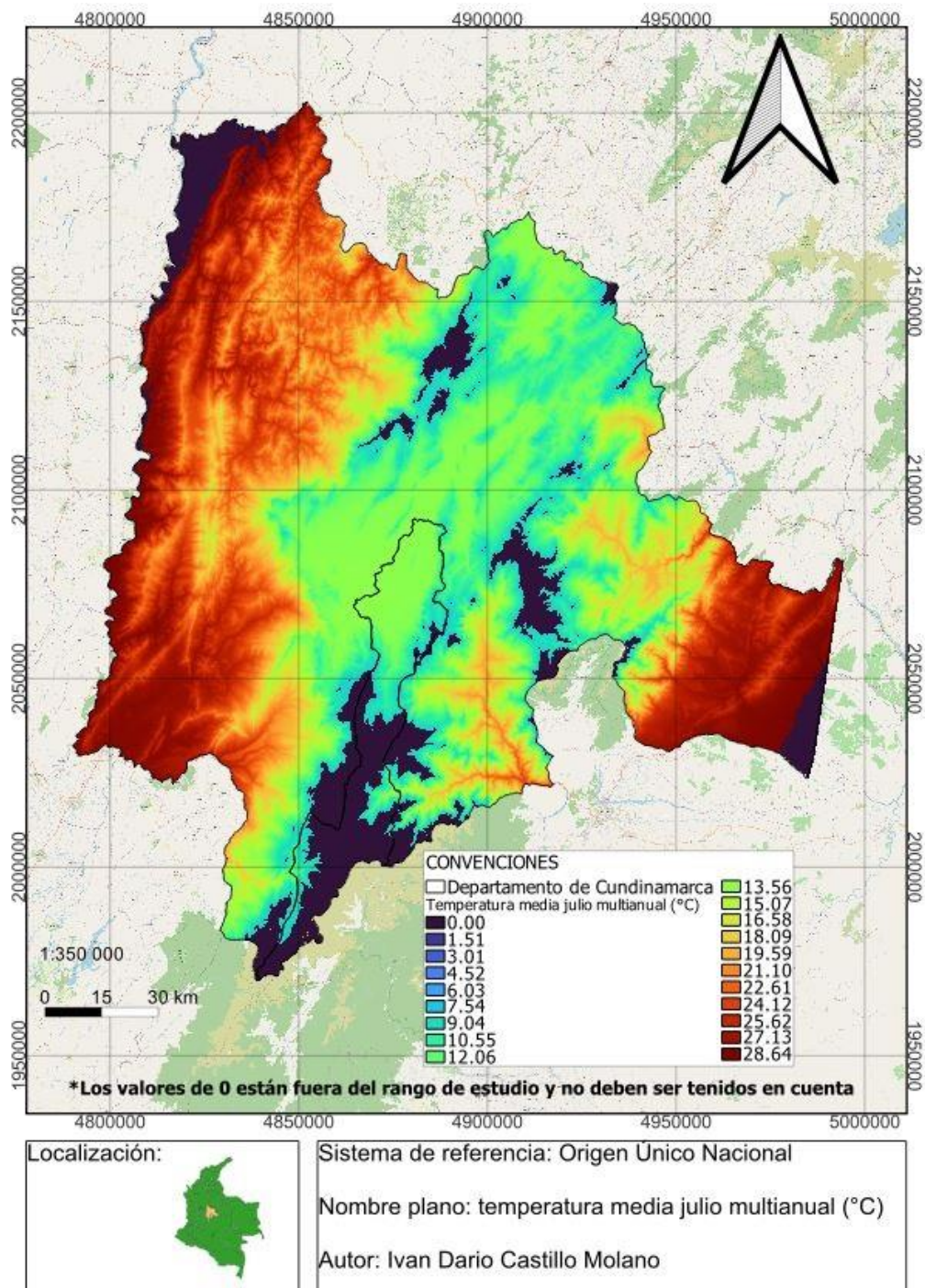
Mapa 4 Temperatura media abril multianual para el departamento de Cundinamarca



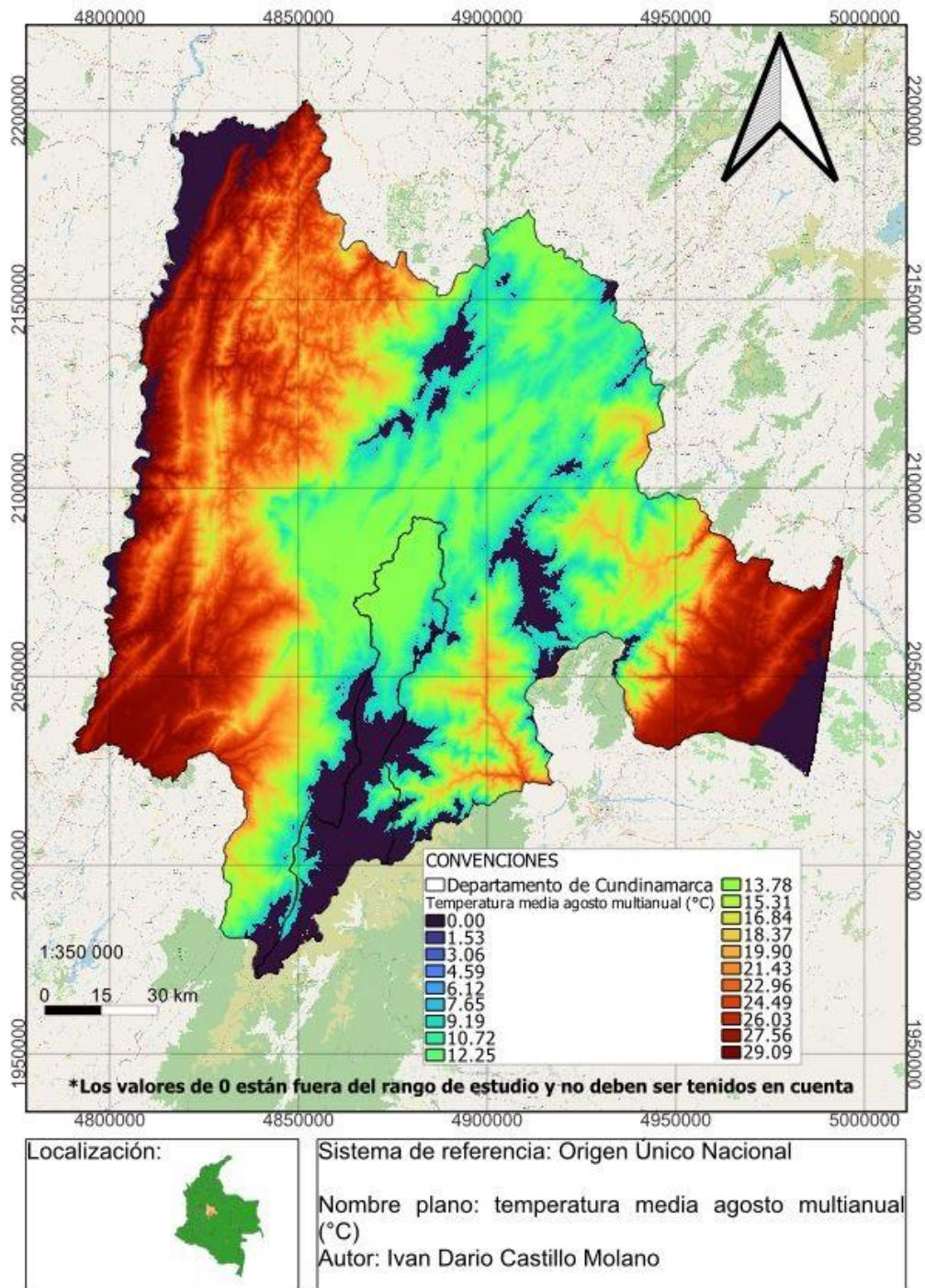
Mapa 5 Temperatura media mayo multianual para el departamento de Cundinamarca



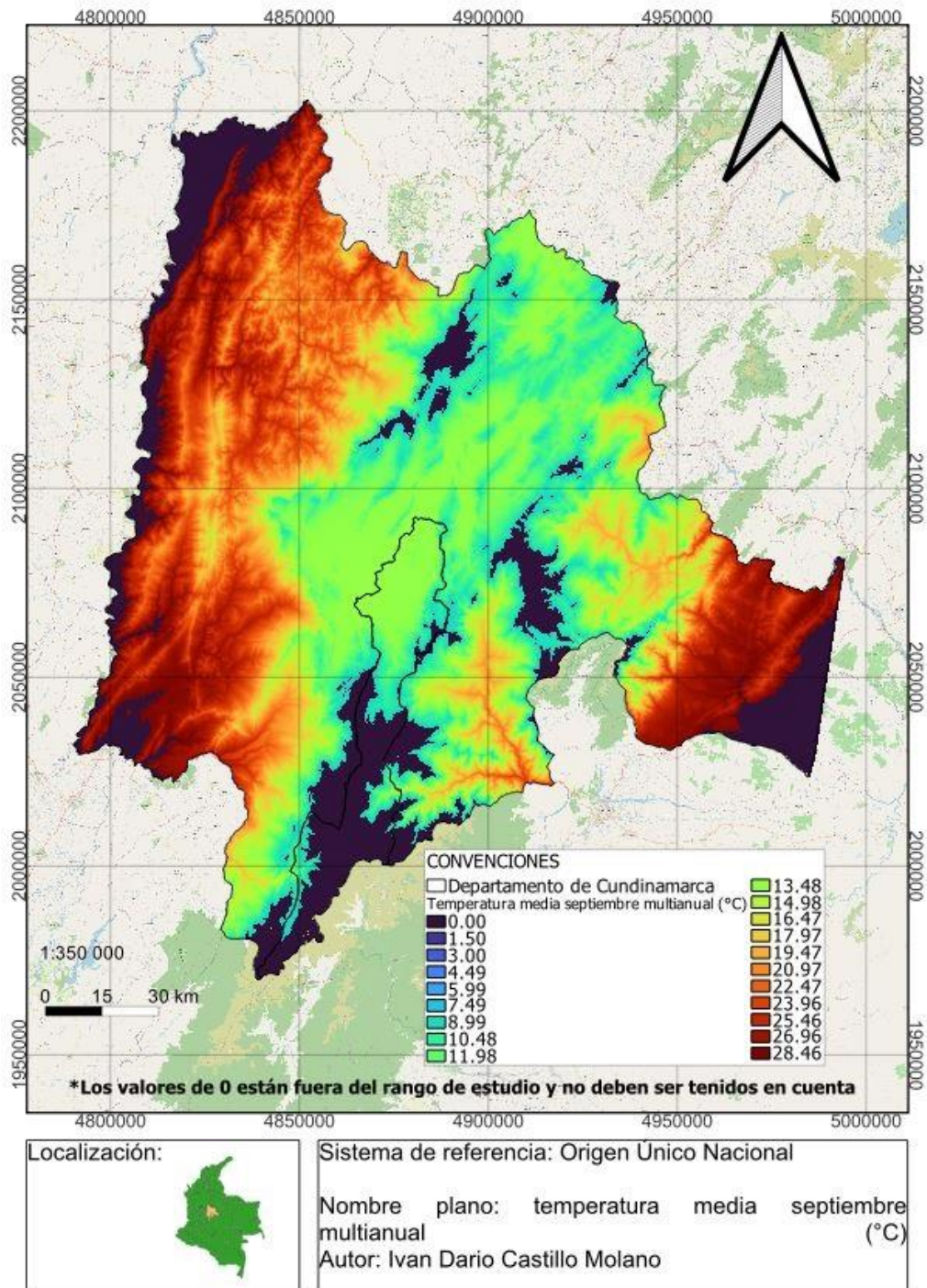
Mapa 6 Temperatura media junio multianual para el departamento de Cundinamarca



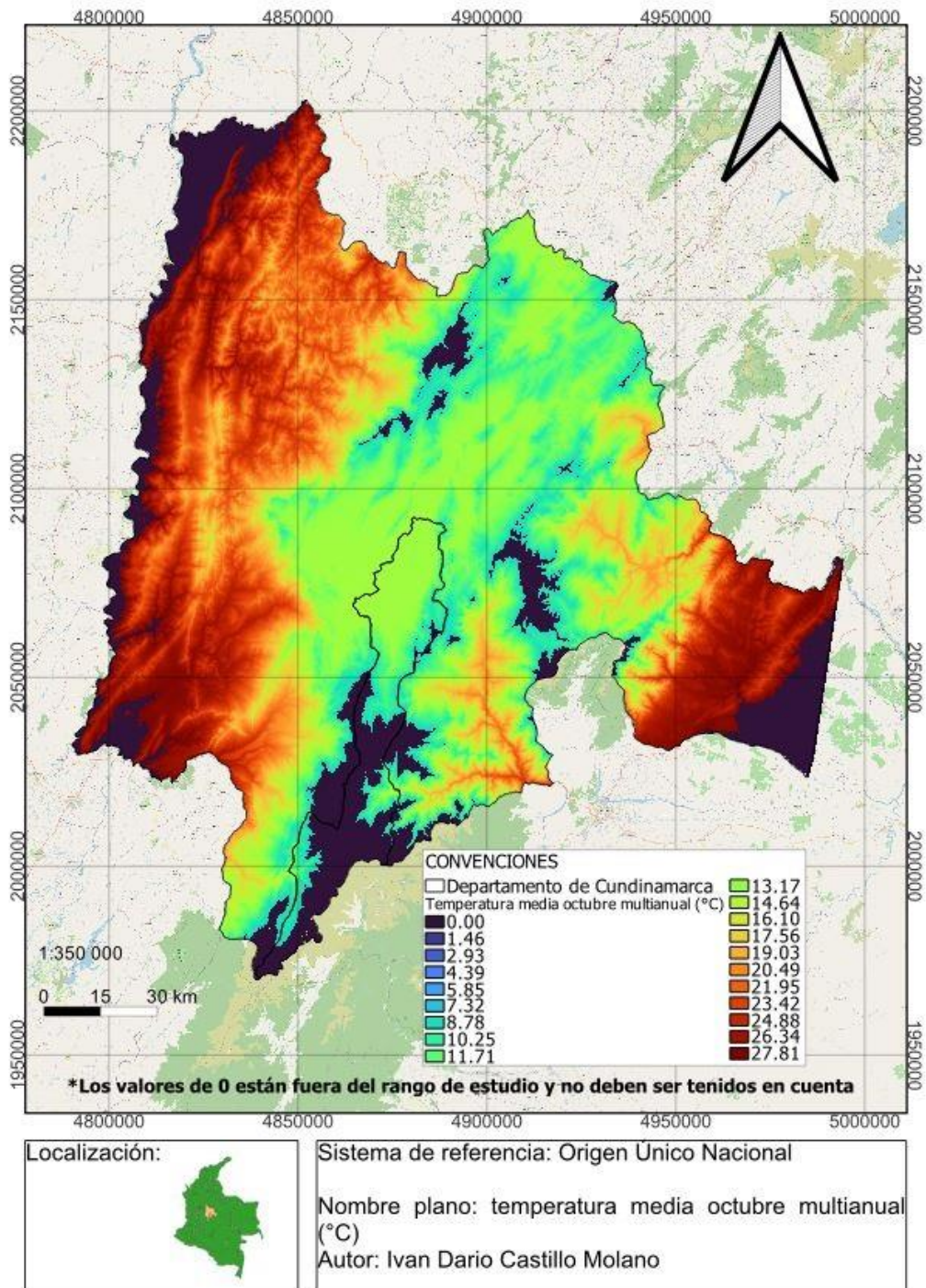
Mapa 7 Temperatura media julio multianual para el departamento de Cundinamarca



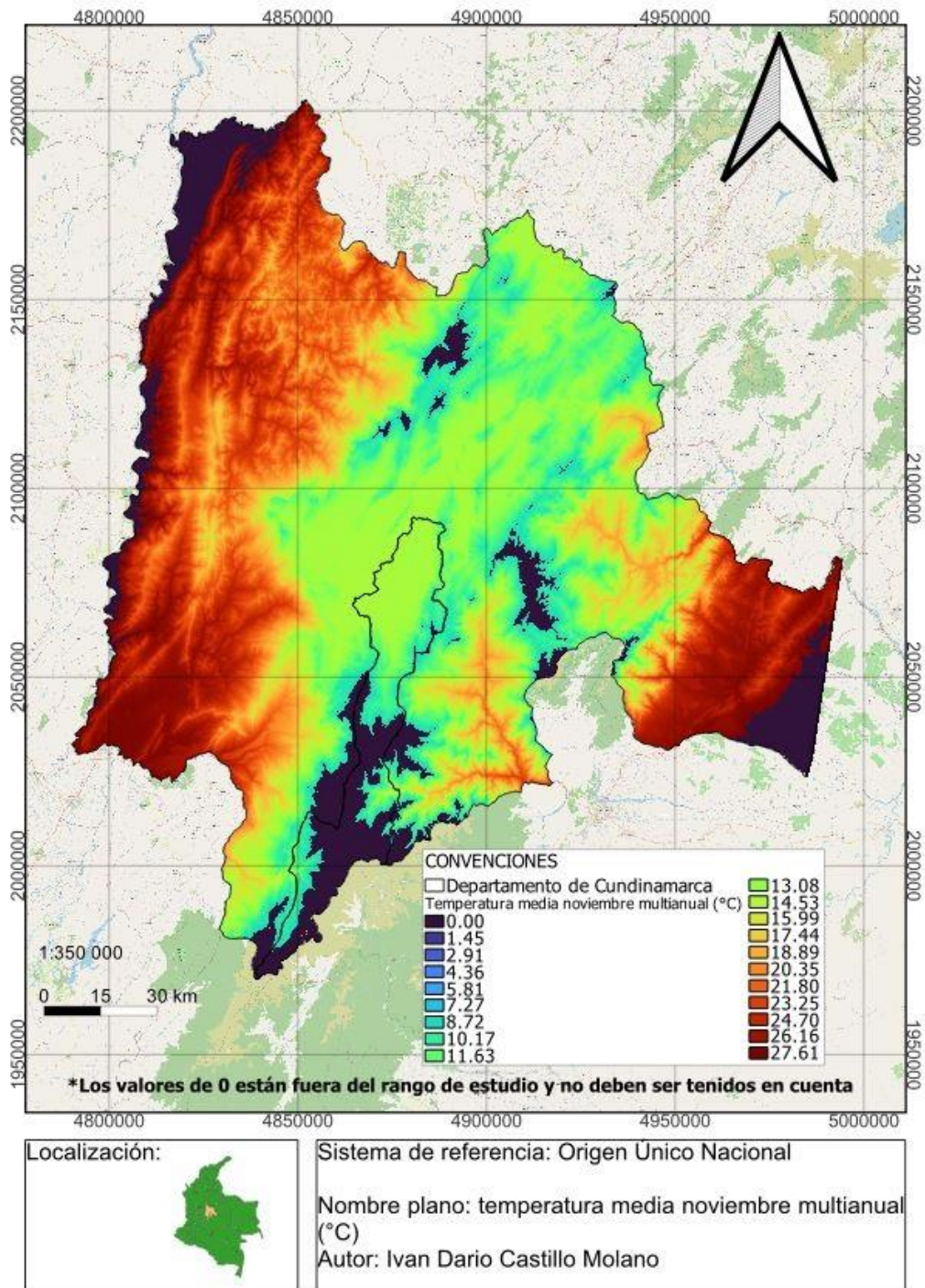
Mapa 8 Temperatura media agosto multianual para el departamento de Cundinamarca



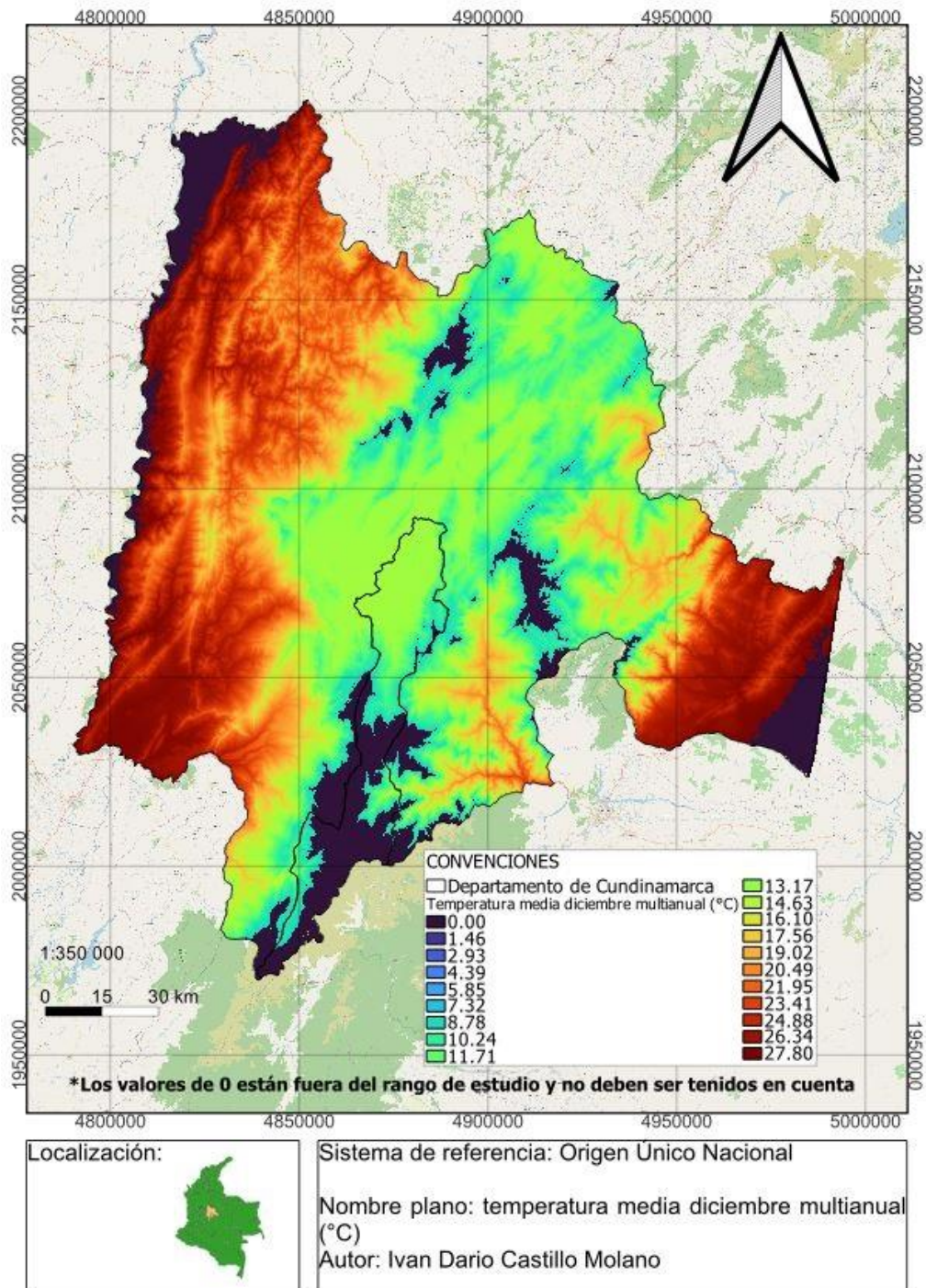
Mapa 9 Temperatura media septiembre multianual para el departamento de Cundinamarca



Mapa 10 Temperatura media octubre multianual para el departamento de Cundinamarca

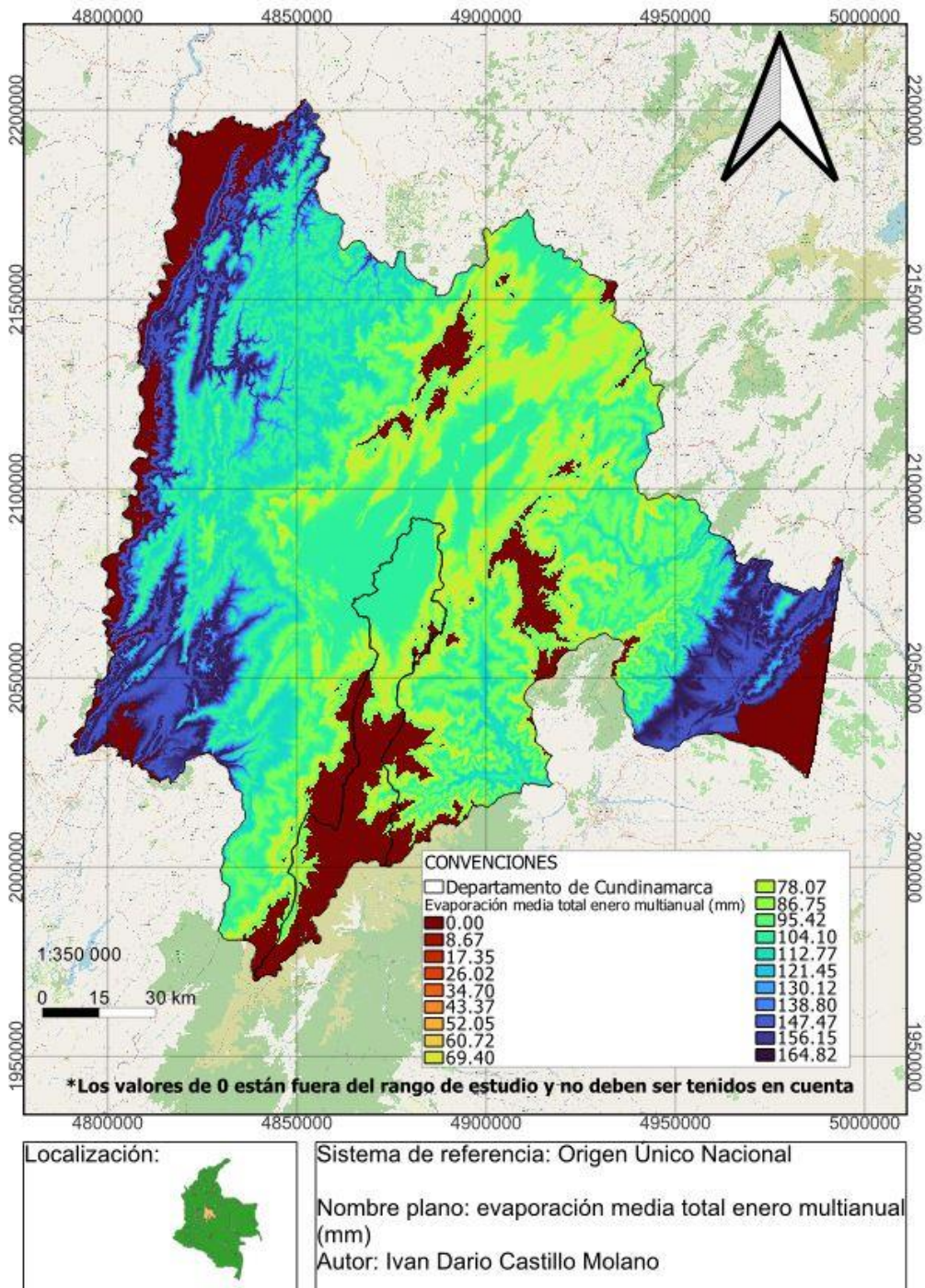


Mapa 11 Temperatura media noviembre multianual para el departamento de Cundinamarca

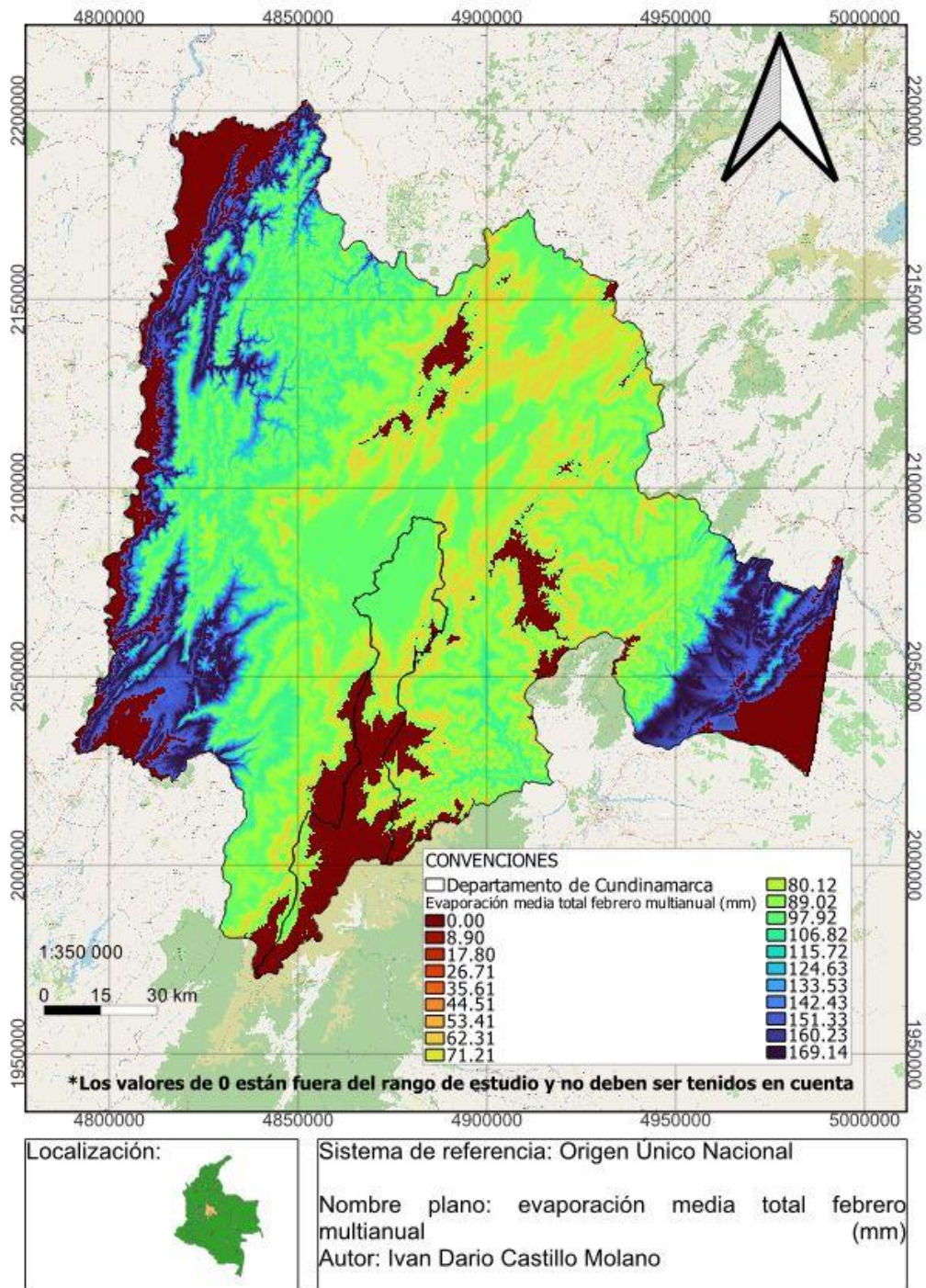


Mapa 12 Temperatura media diciembre multianual para el departamento de Cundinamarca

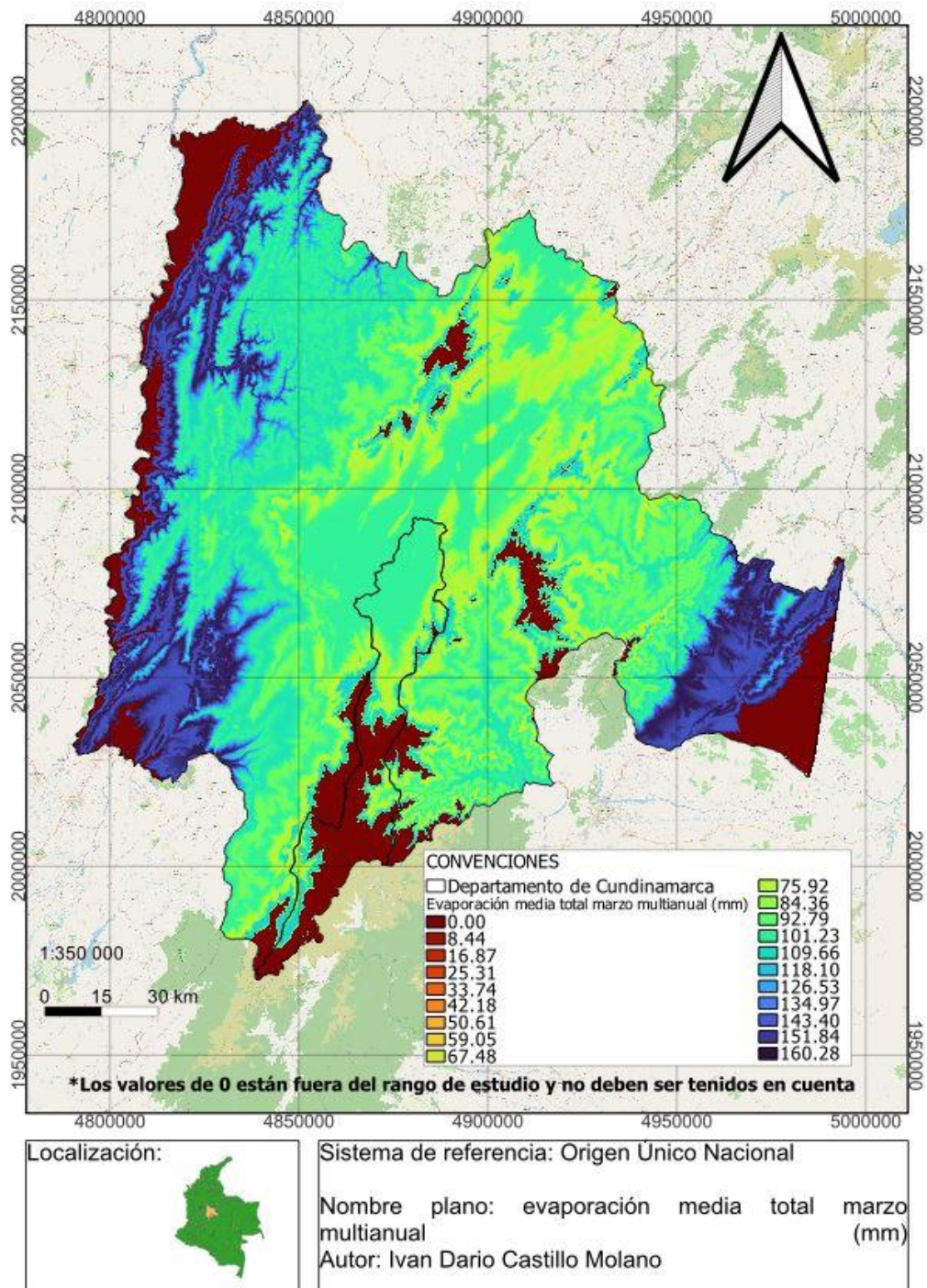
9.8.2 Mapas de evaporación



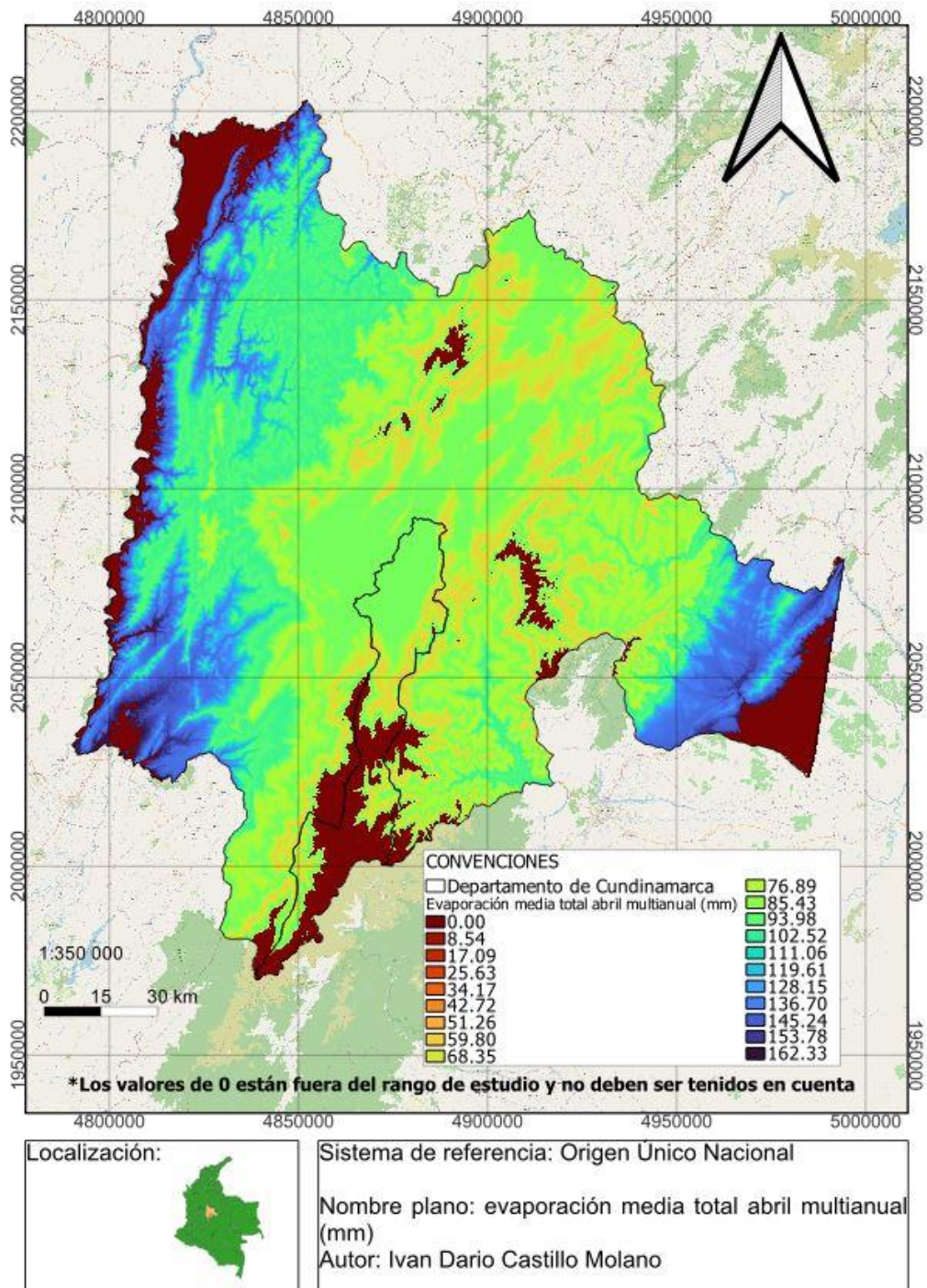
Mapa 13 Evaporación media total enero multianual para el departamento de Cundinamarca



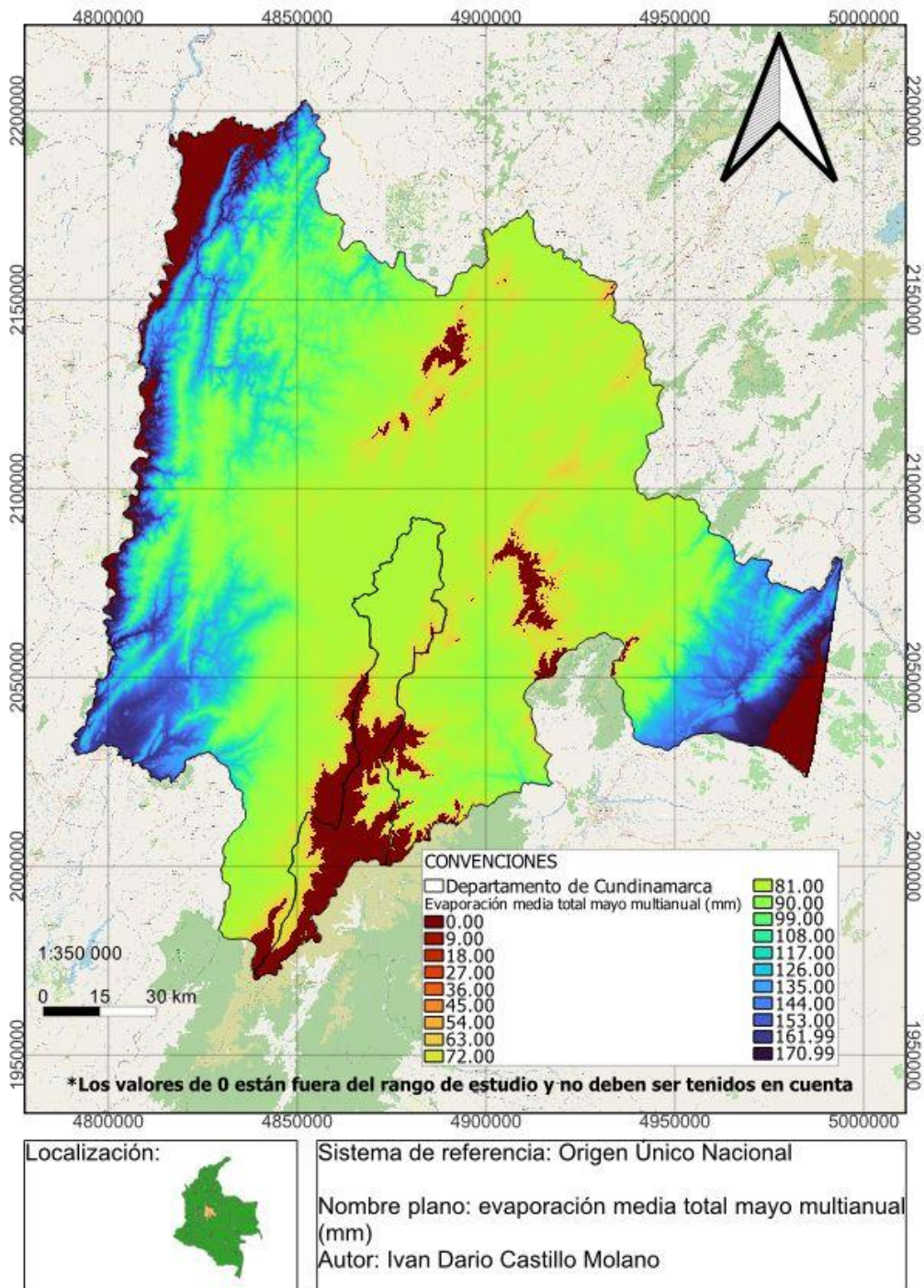
Mapa 14 Evaporación media total febrero multianual para el departamento de Cundinamarca



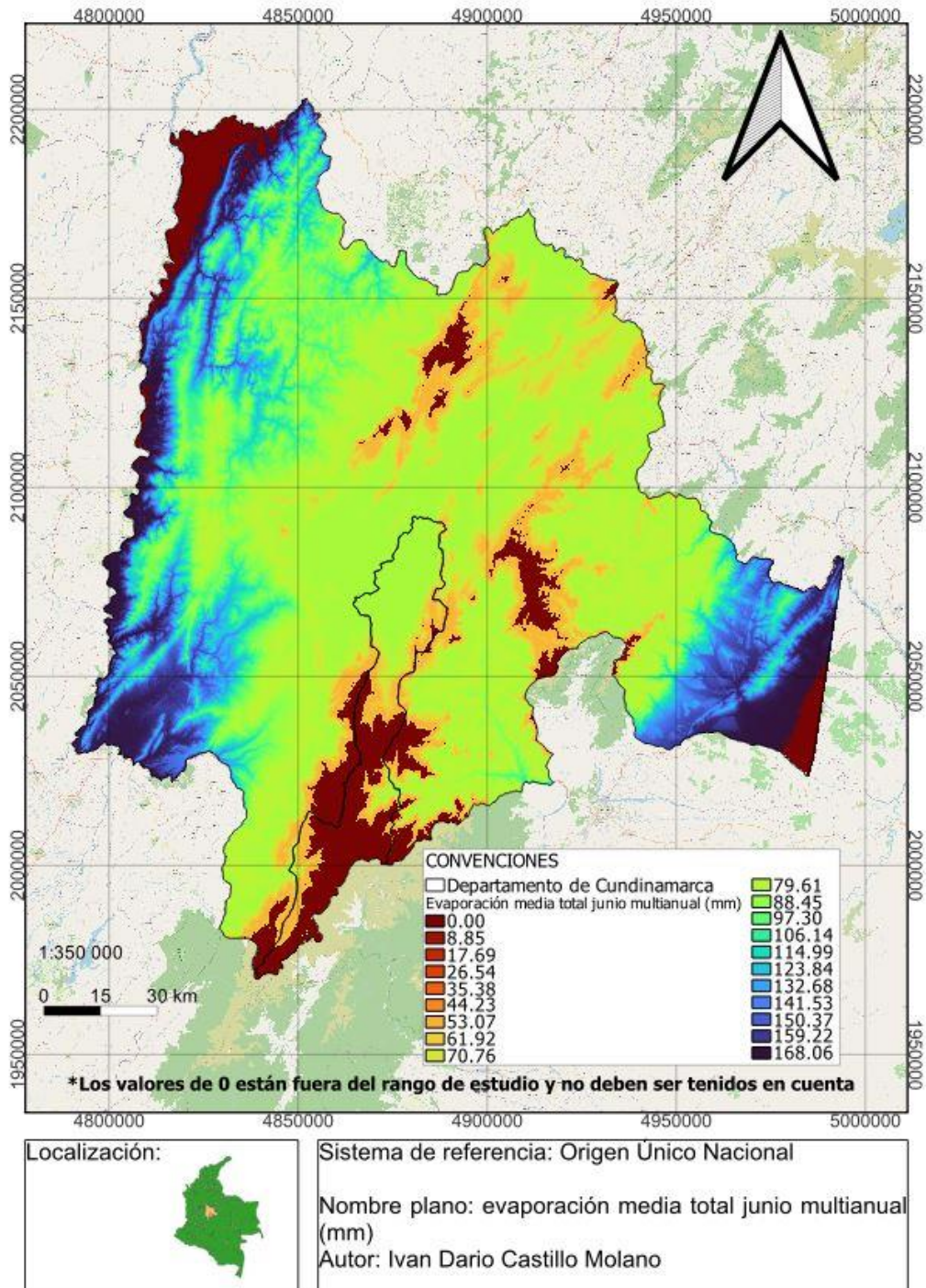
Mapa 15 Evaporación media total marzo multianual para el departamento de Cundinamarca



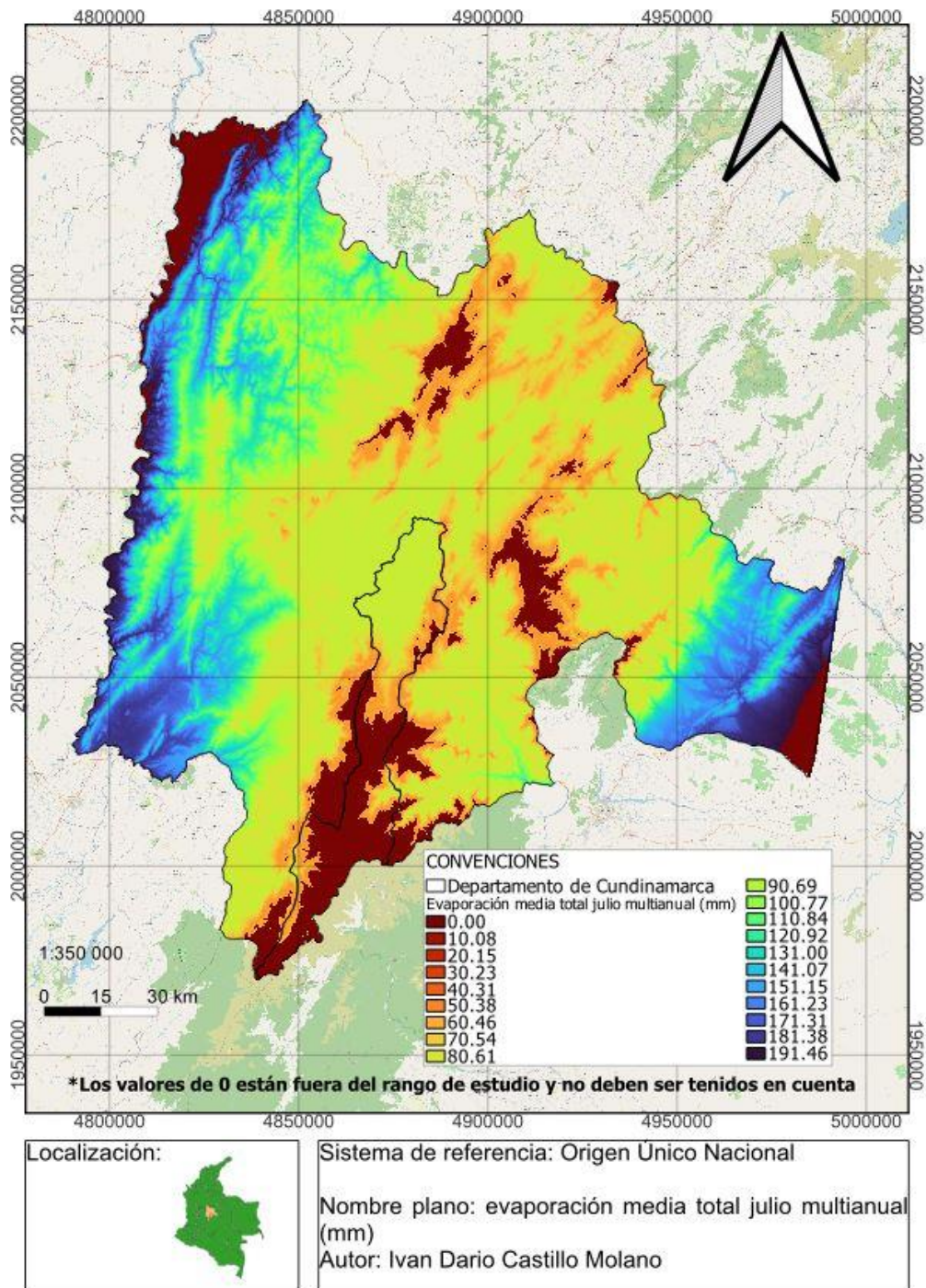
Mapa 16 Evaporación media total abril multianual para el departamento de Cundinamarca



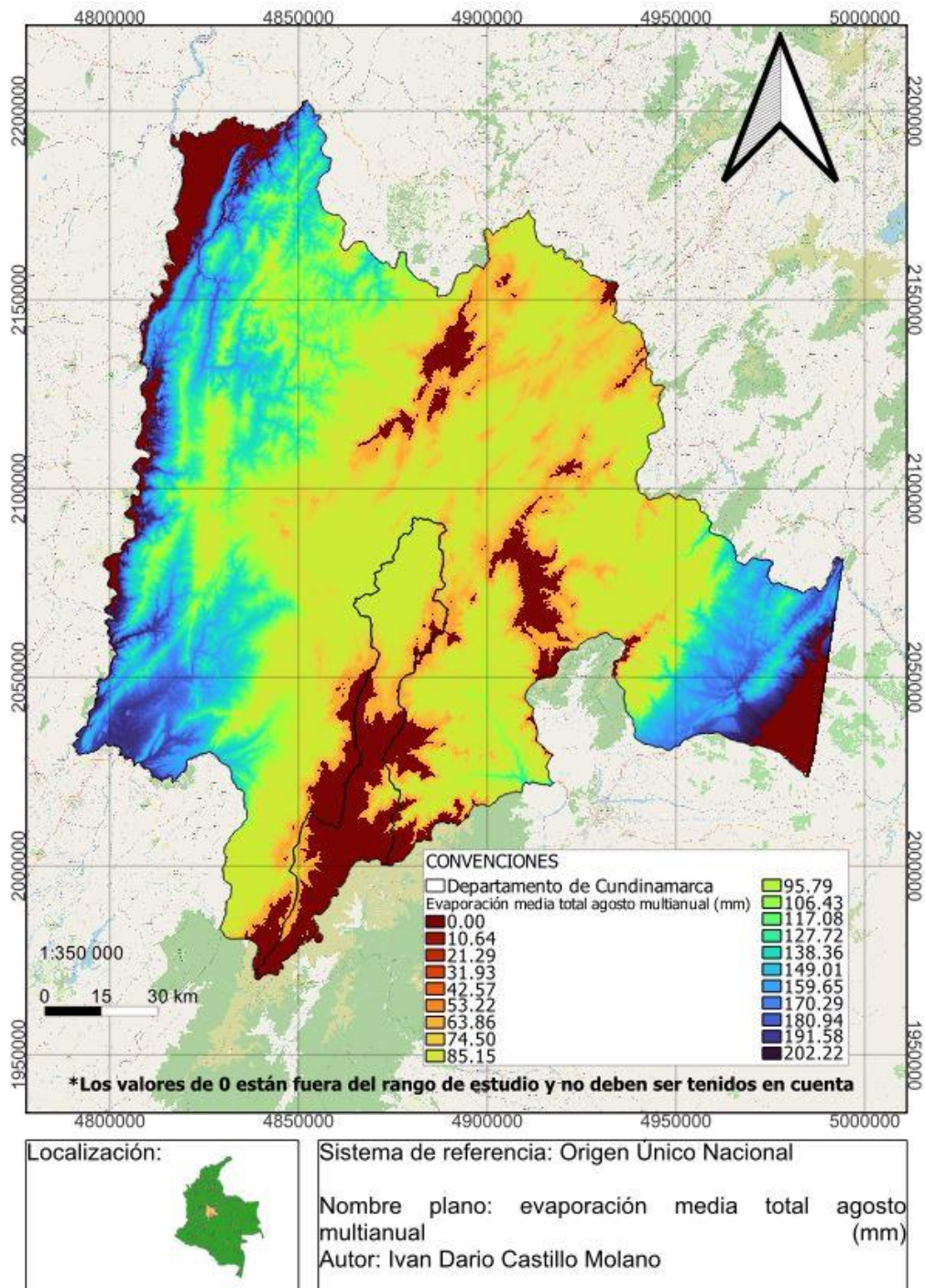
Mapa 17 Evaporación media total mayo multianual para el departamento de Cundinamarca



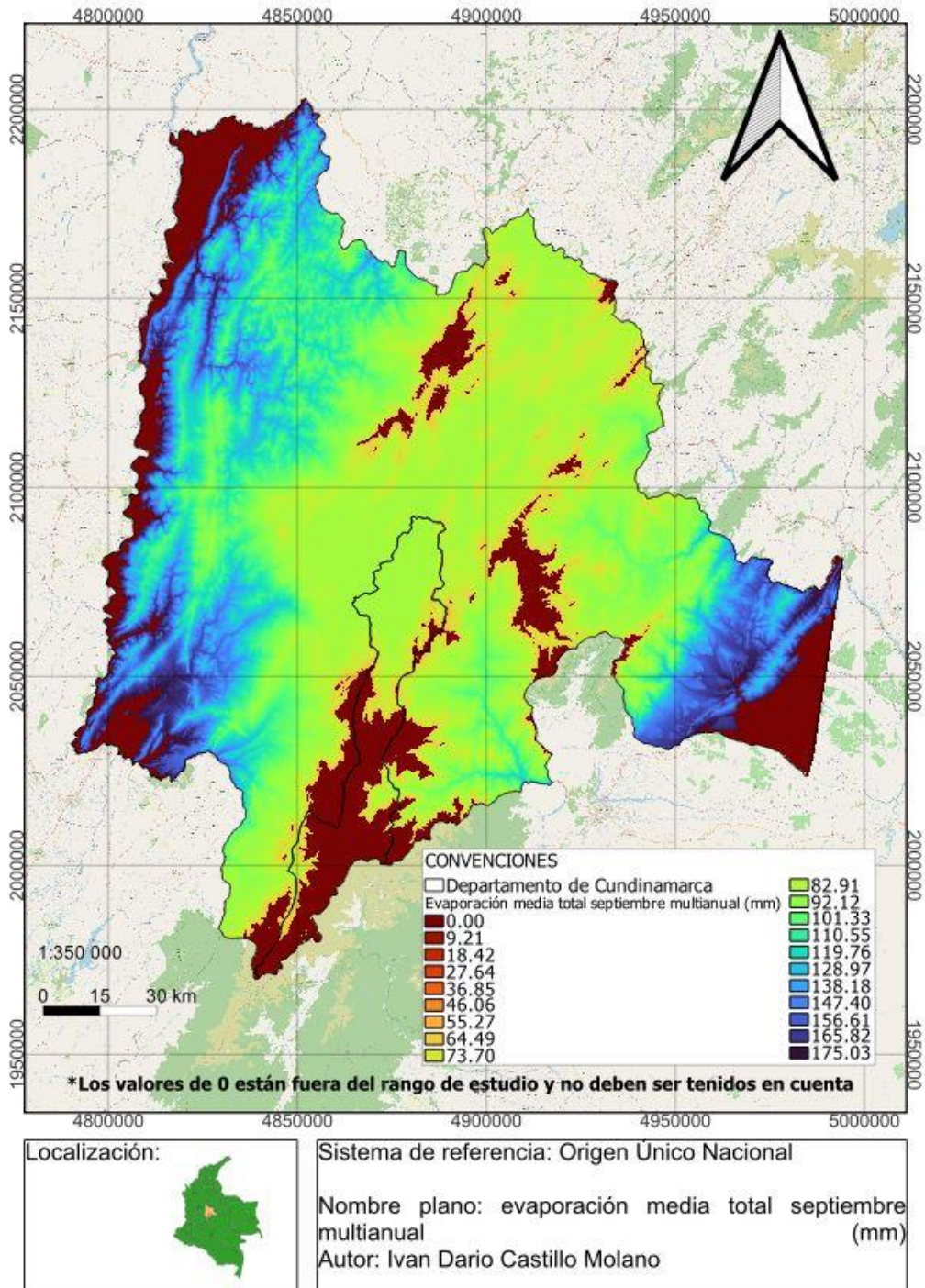
Mapa 18 Evaporación media total junio multianual para el departamento de Cundinamarca



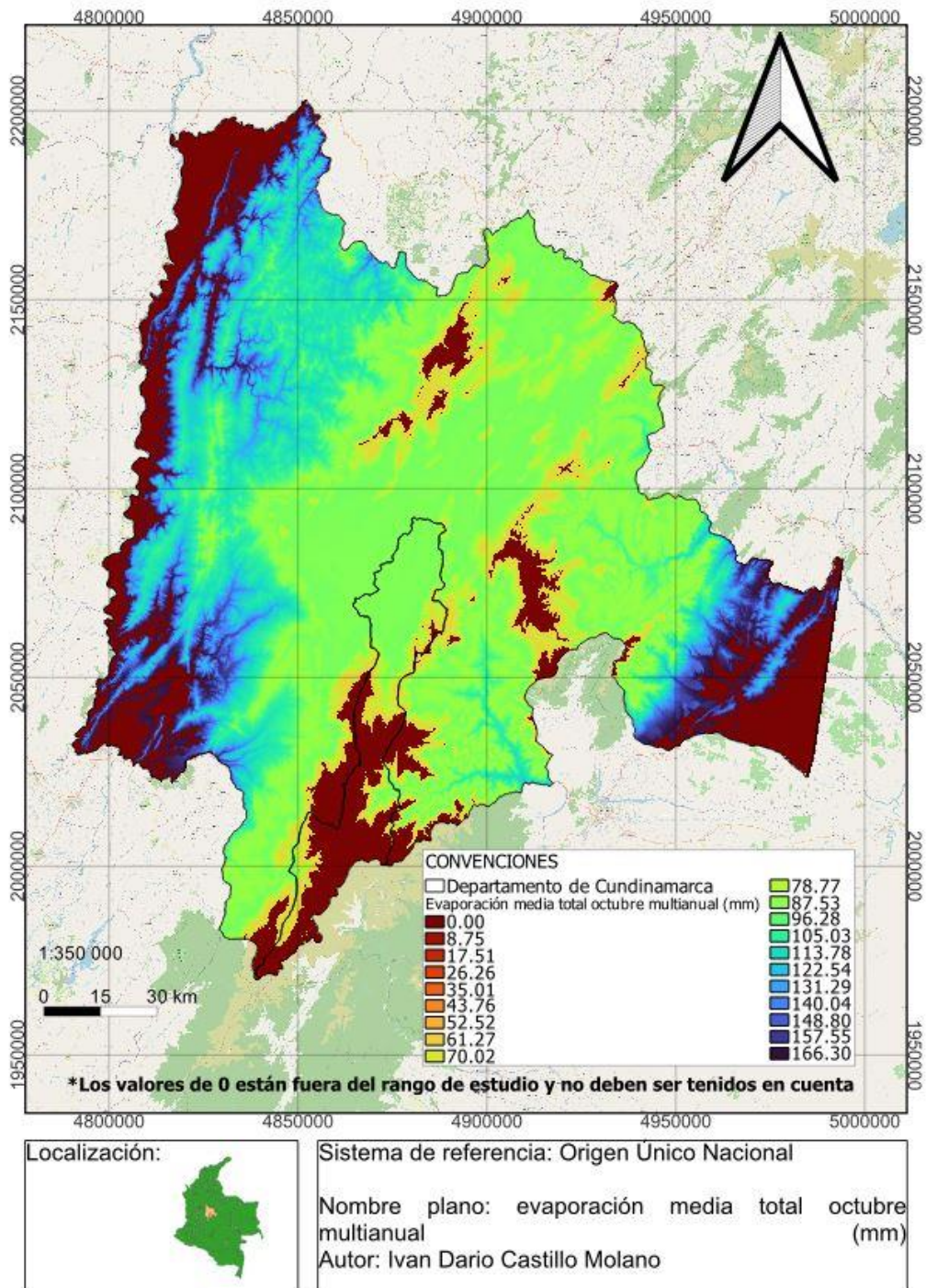
Mapa 19 Evaporación media total julio multianual para el departamento de Cundinamarca



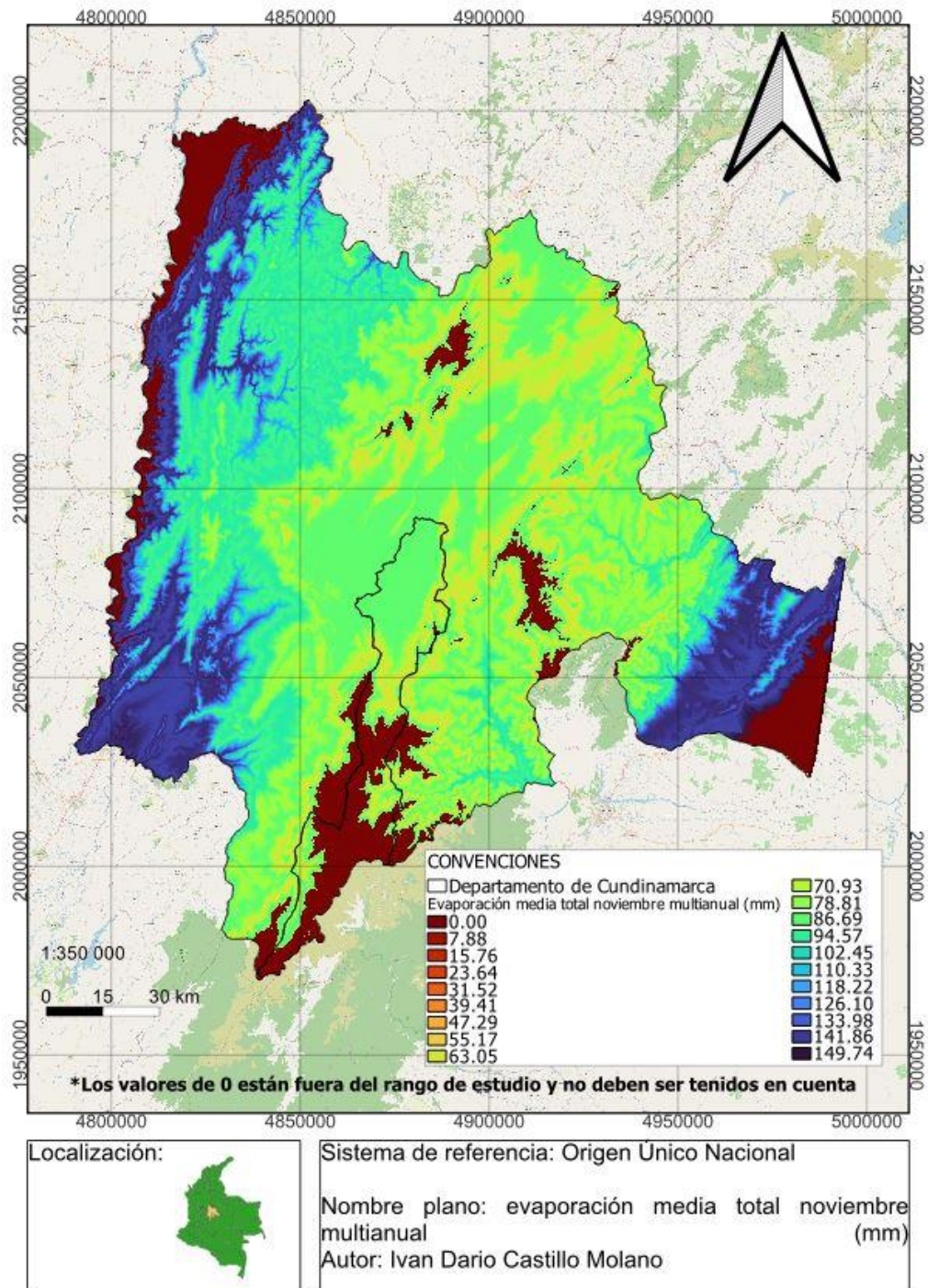
Mapa 20 Evaporación media total agosto multianual para el departamento de Cundinamarca



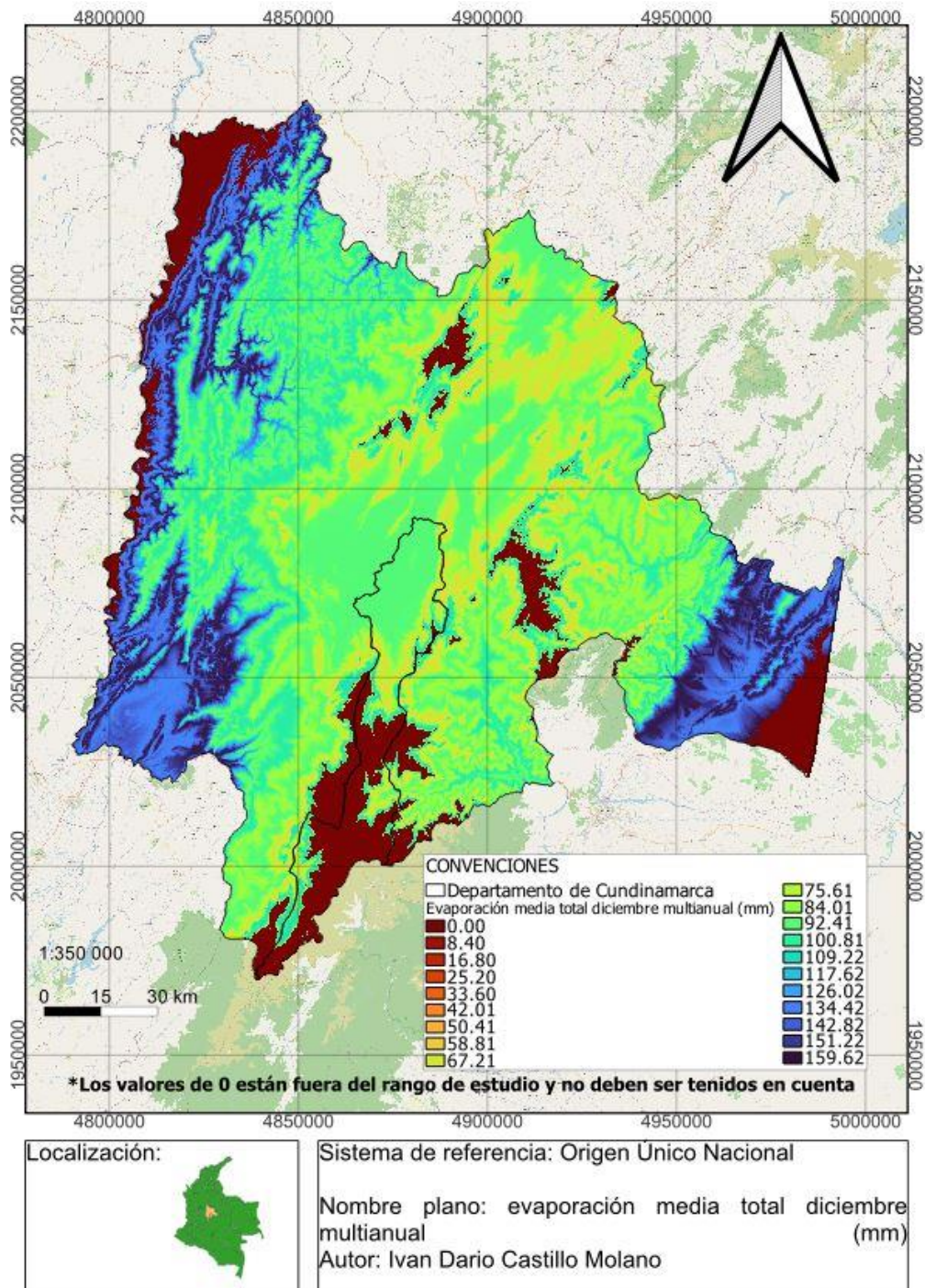
Mapa 21 Evaporación media total septiembre multianual para el departamento de Cundinamarca



Mapa 22 Evaporación media total octubre multianual para el departamento de Cundinamarca

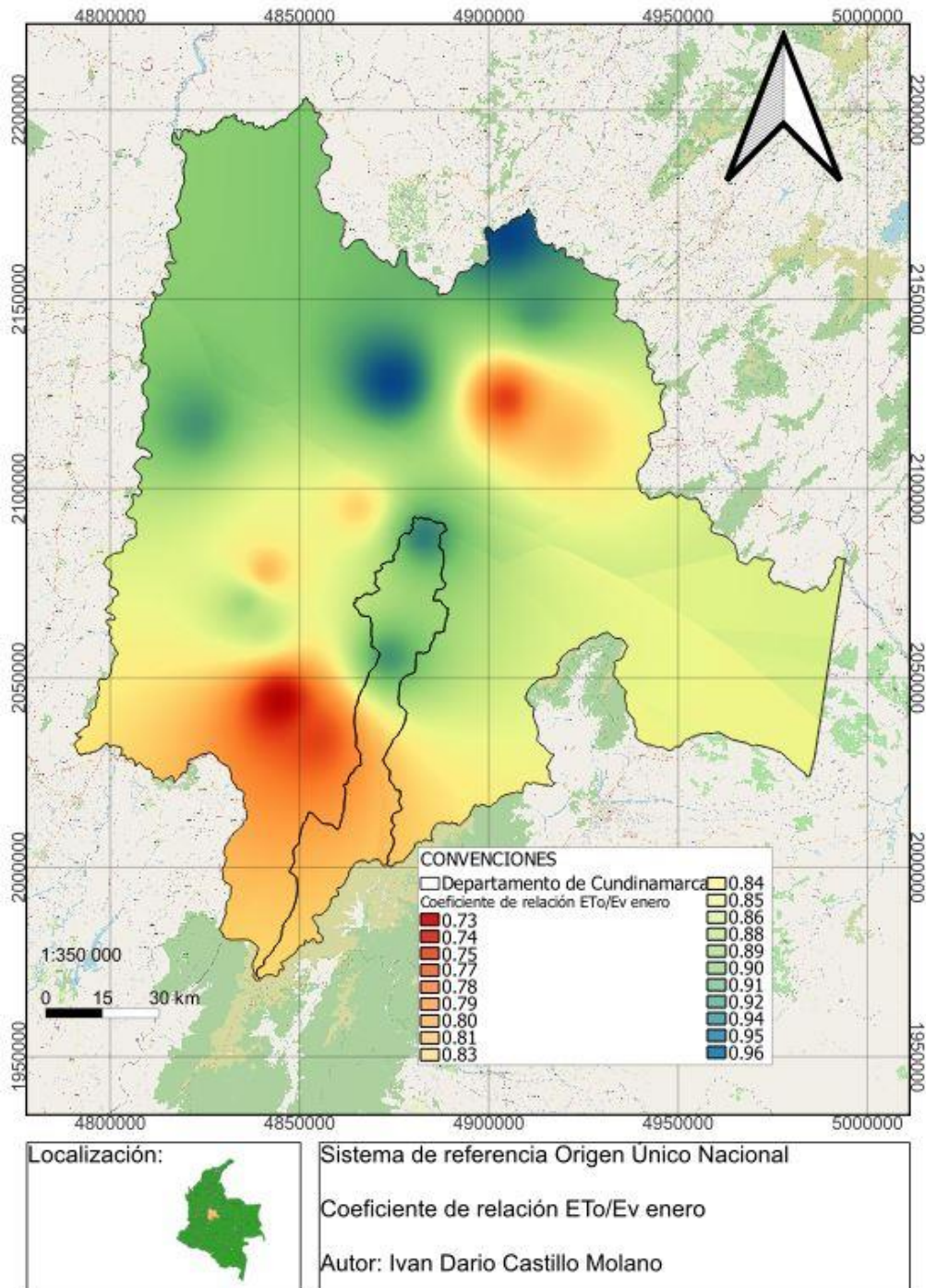


Mapa 23 Evaporación media total noviembre multianual para el departamento de Cundinamarca

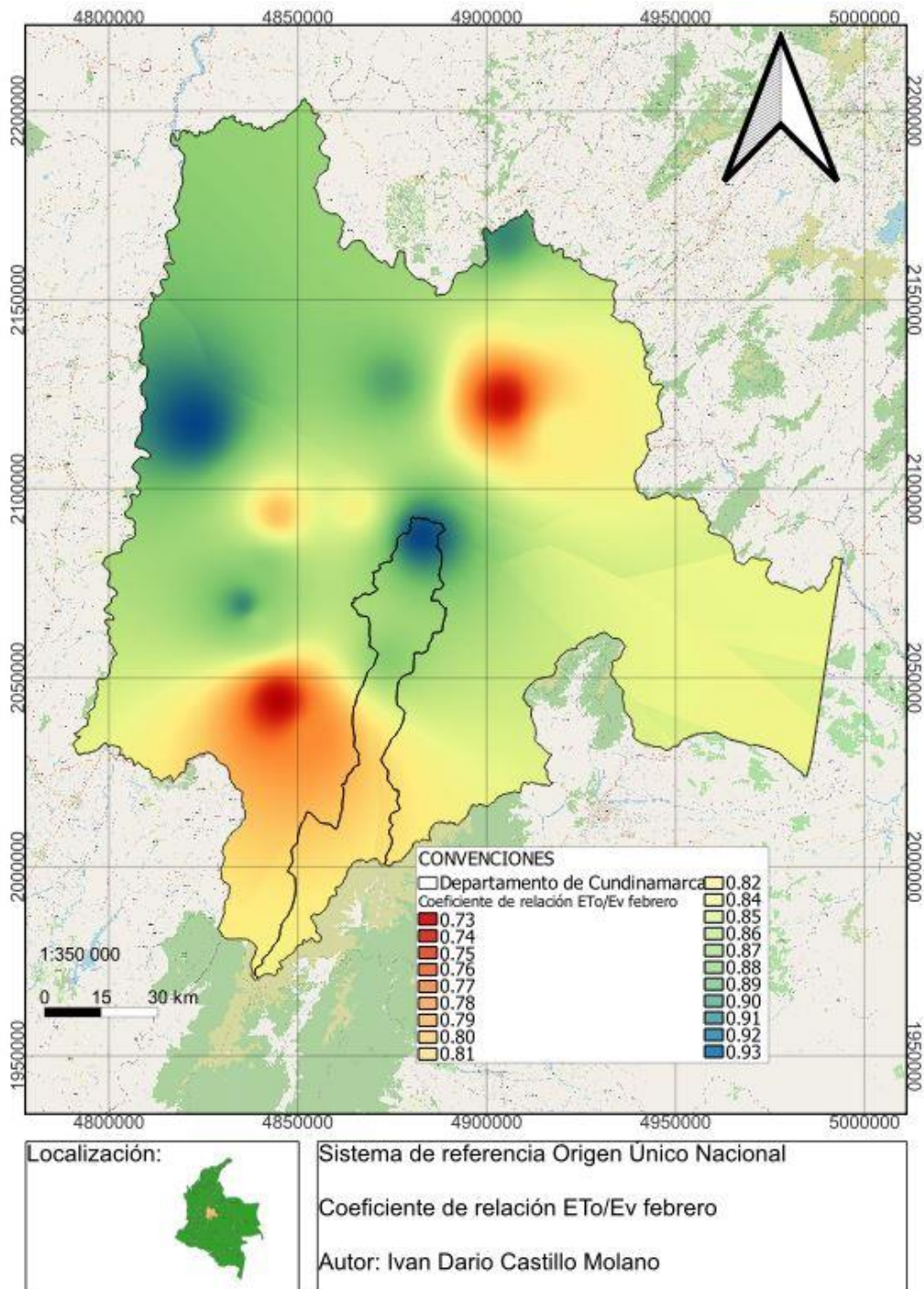


Mapa 24 Evaporación media total diciembre multianual para el departamento de Cundinamarca

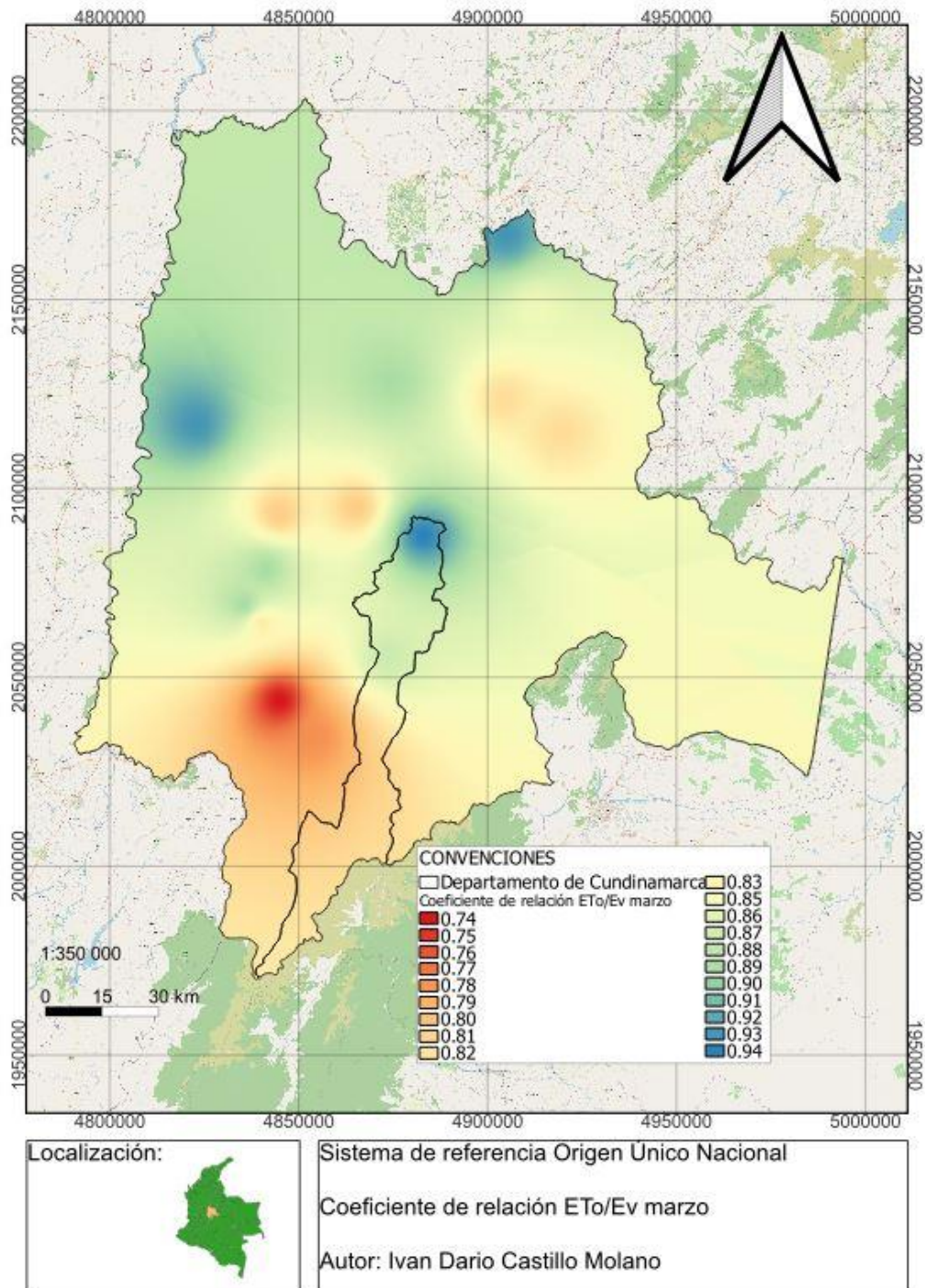
9.8.3 Mapas de coeficientes



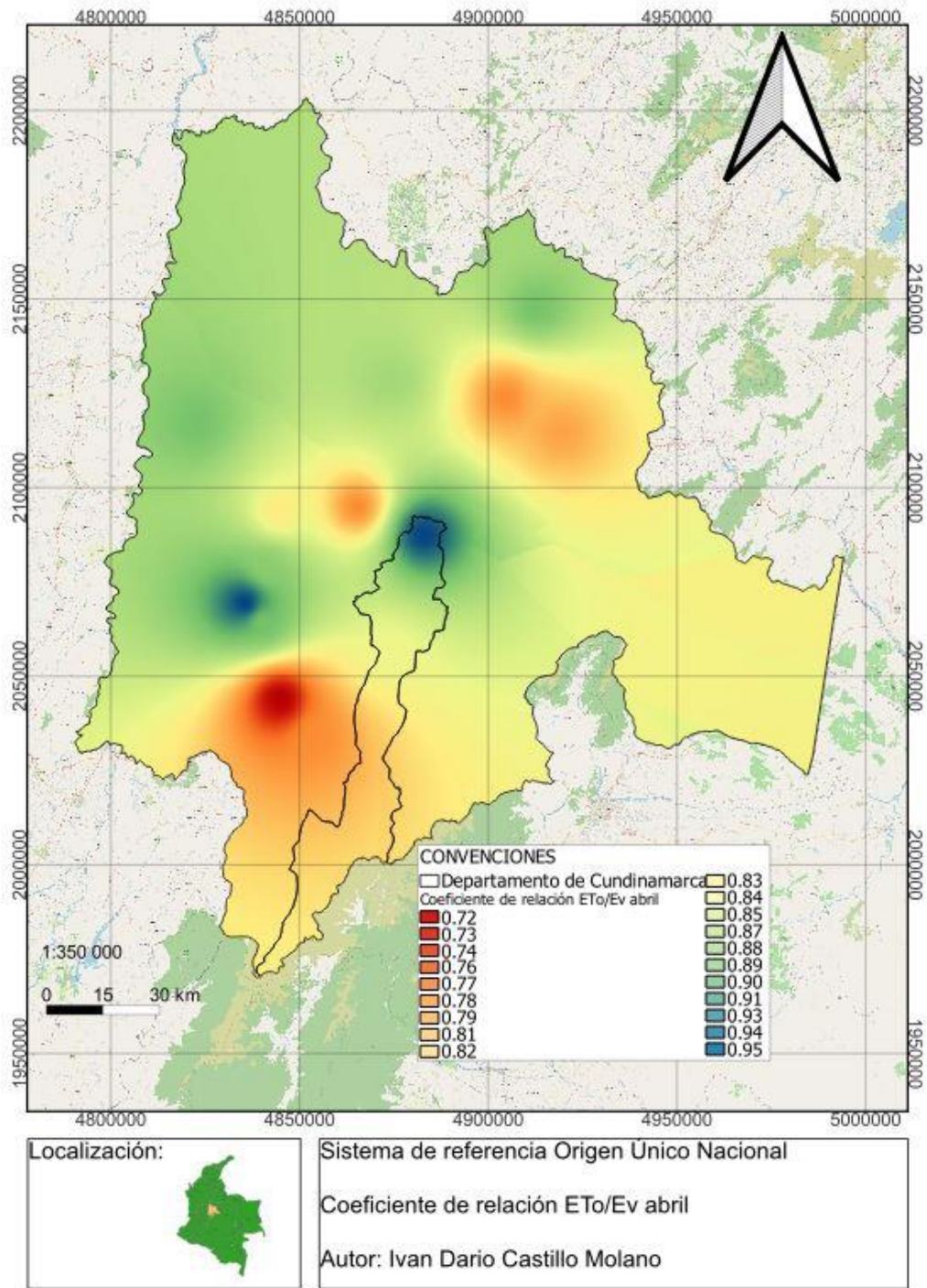
Mapa 25 Coeficientes de relación $k = ETo/Ev$ de enero para el departamento de Cundinamarca



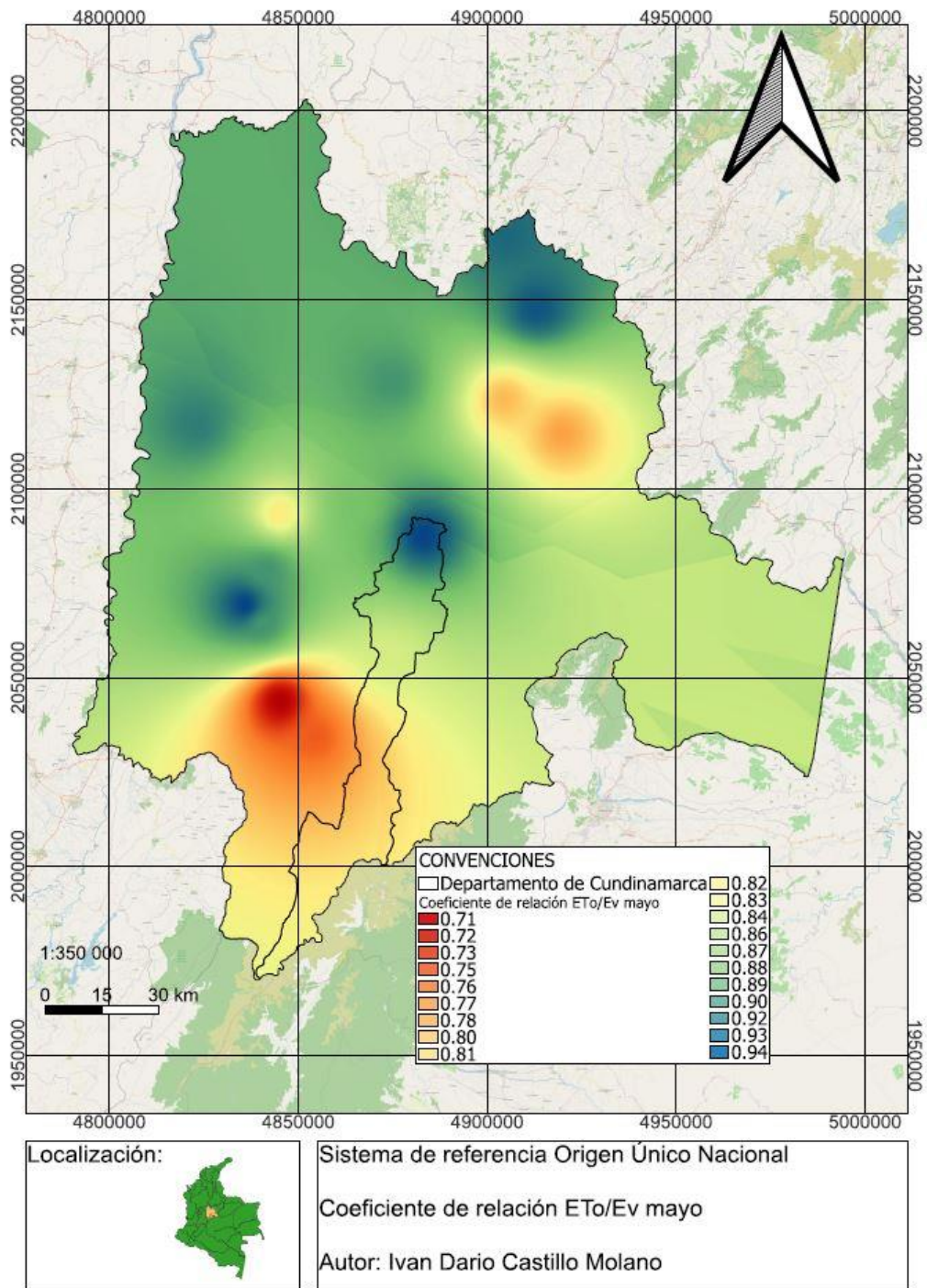
Mapa 26 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de febrero para el departamento de Cundinamarca



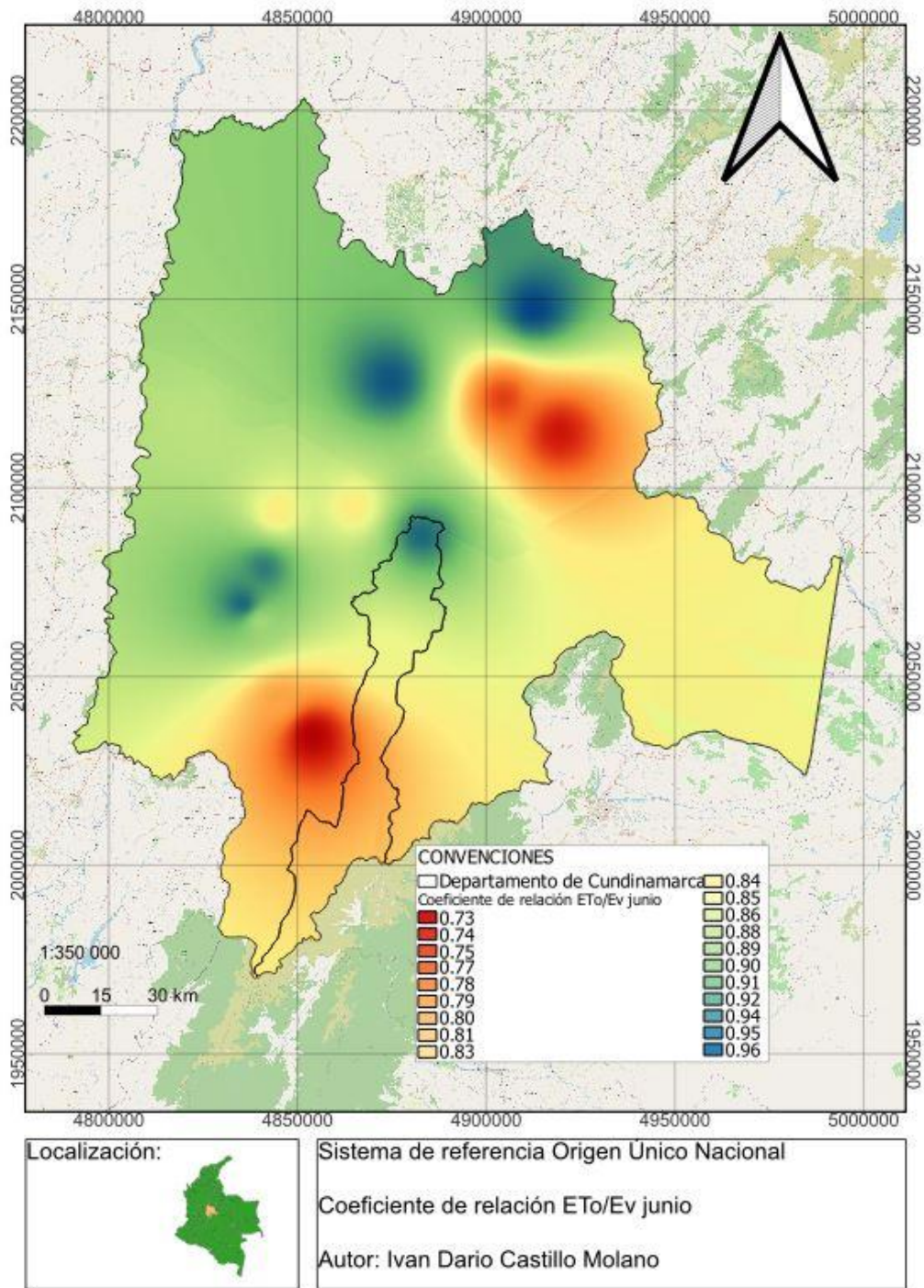
Mapa 27 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de marzo para el departamento de Cundinamarca



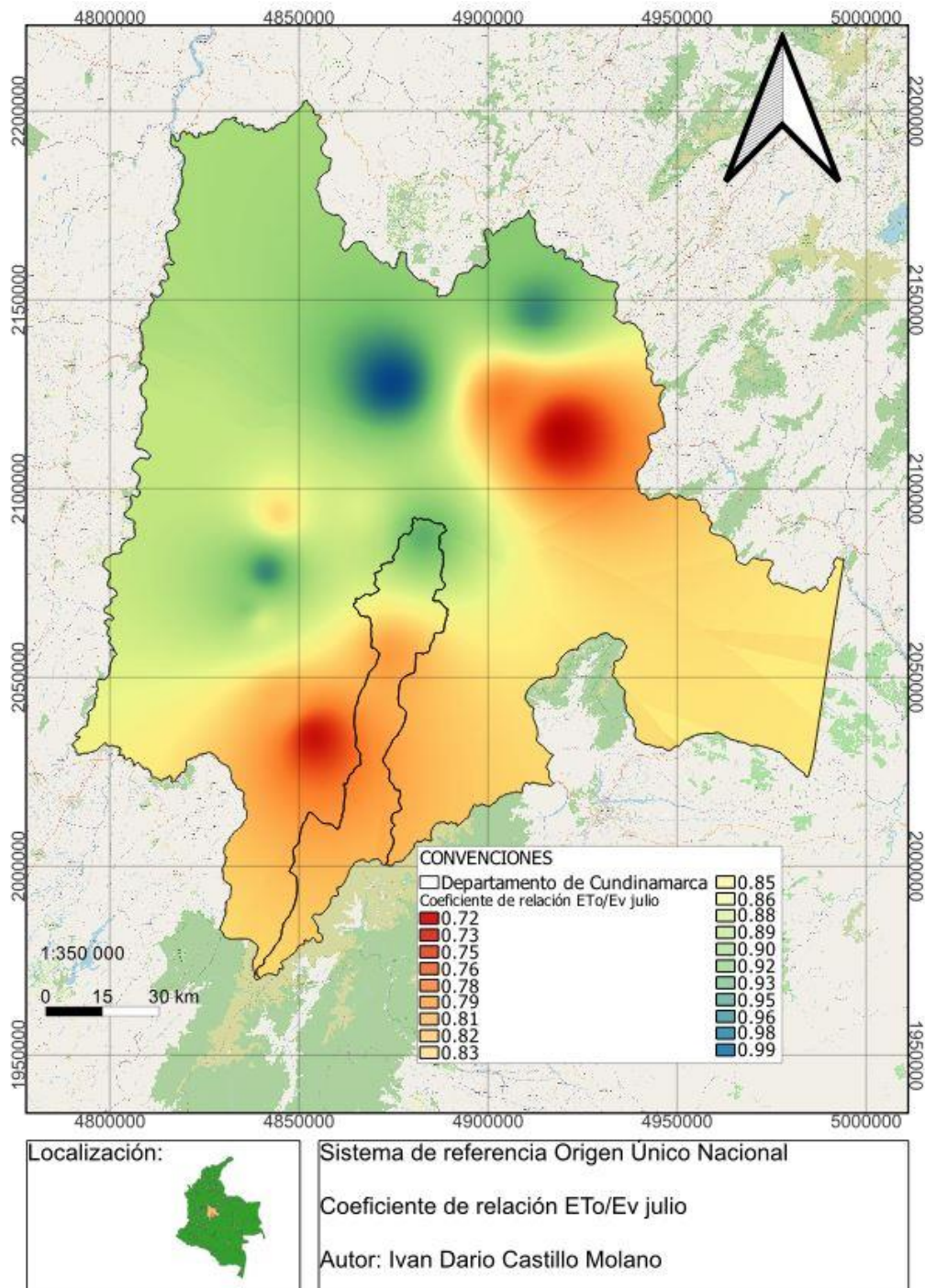
Mapa 28 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de abril para el departamento de Cundinamarca



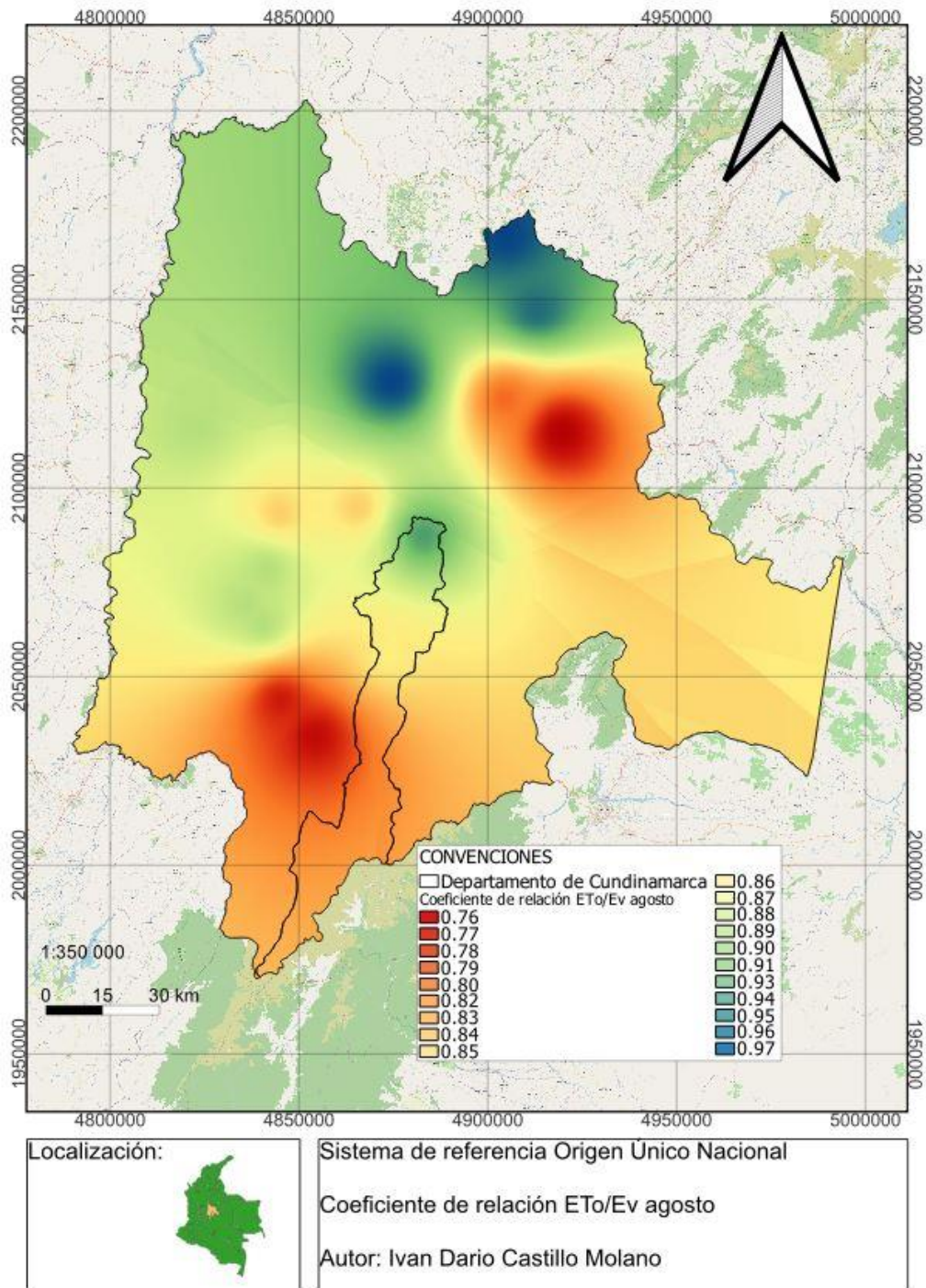
Mapa 29 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de mayo para el departamento de Cundinamarca



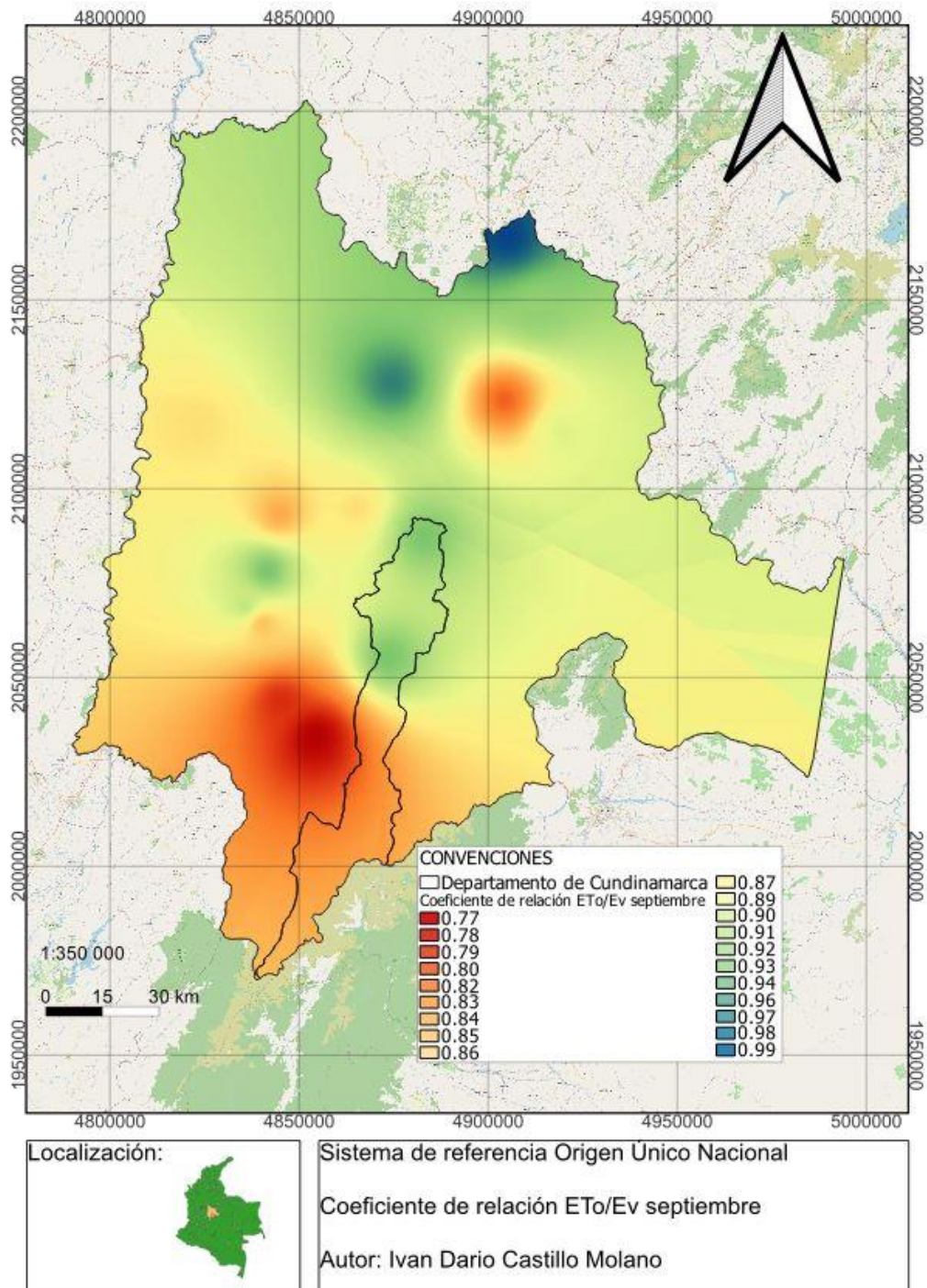
Mapa 30 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de junio para el departamento de Cundinamarca



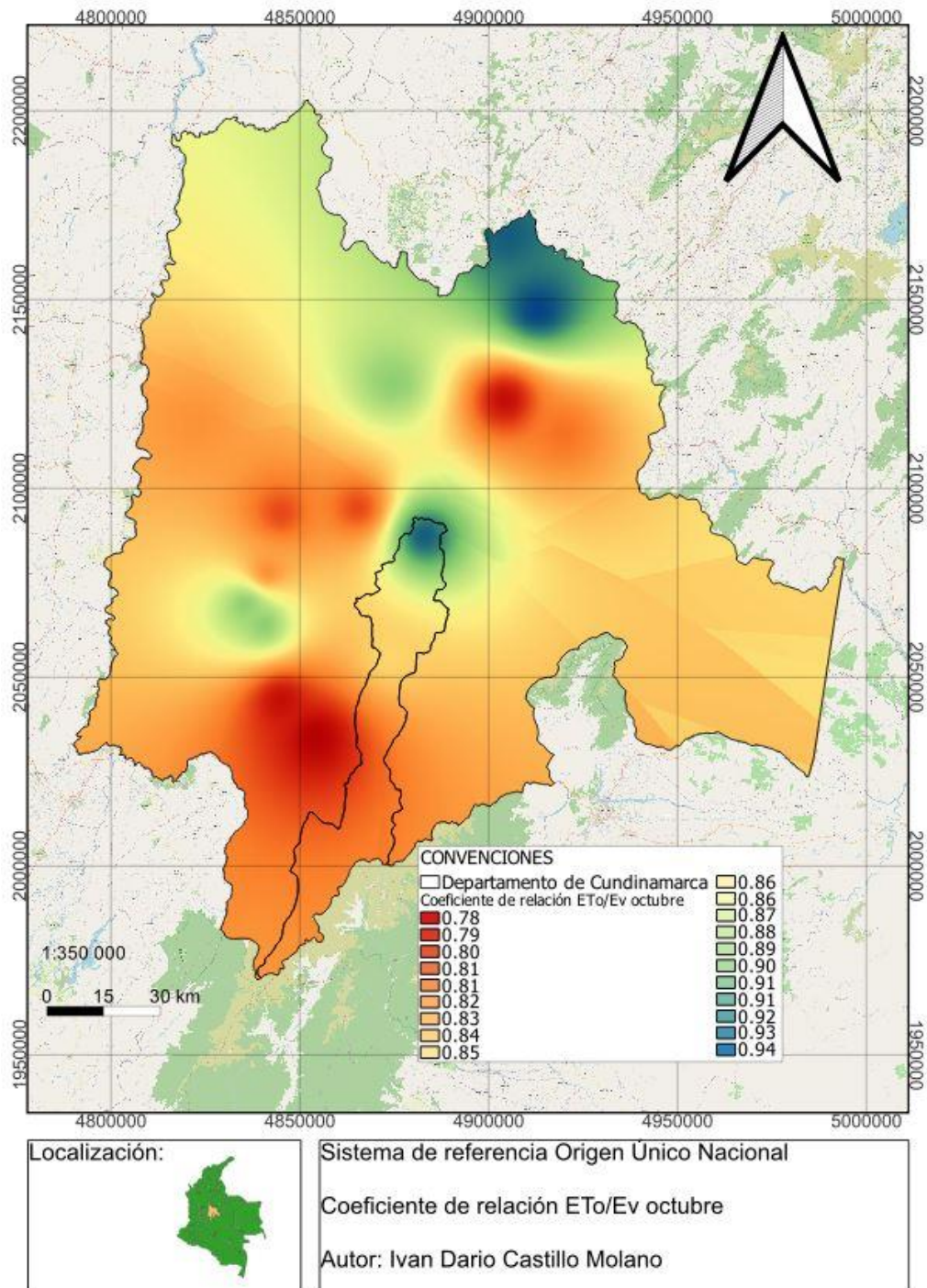
Mapa 31 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de julio para el departamento de Cundinamarca



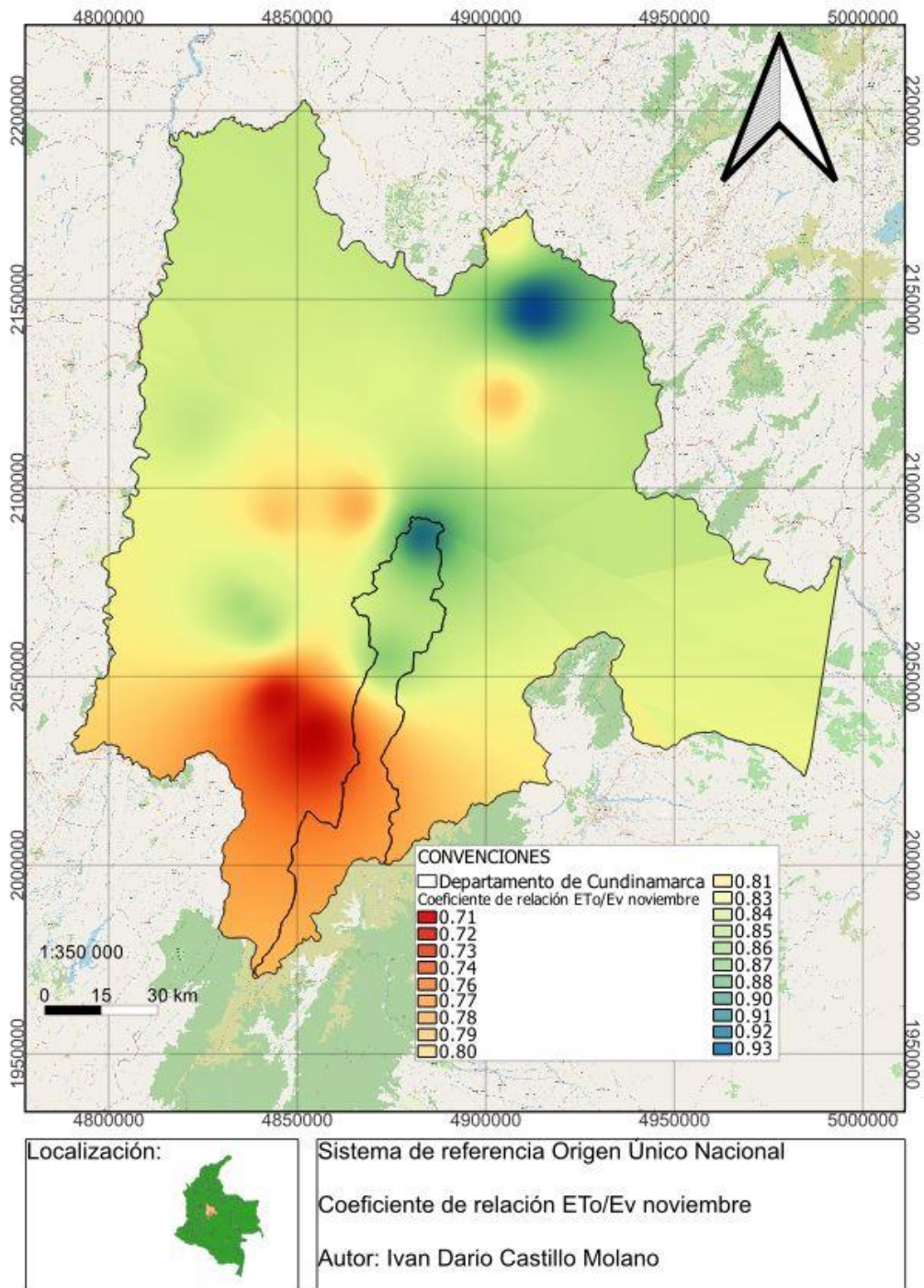
Mapa 32 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de agosto para el departamento de Cundinamarca



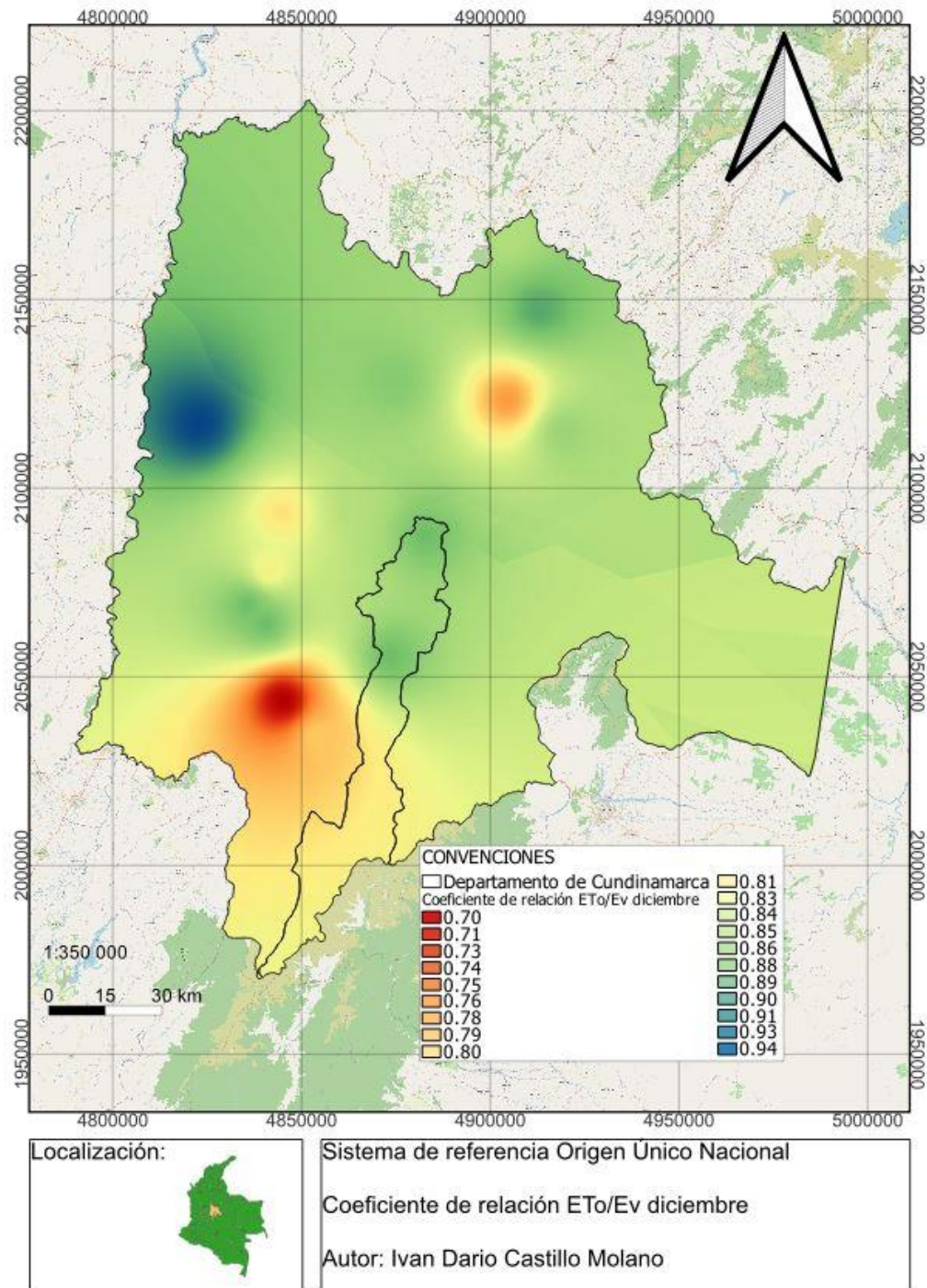
Mapa 33 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de septiembre para el departamento de Cundinamarca



Mapa 34 Coeficientes de relación $k = ETo/Ev$ de octubre para el departamento de Cundinamarca

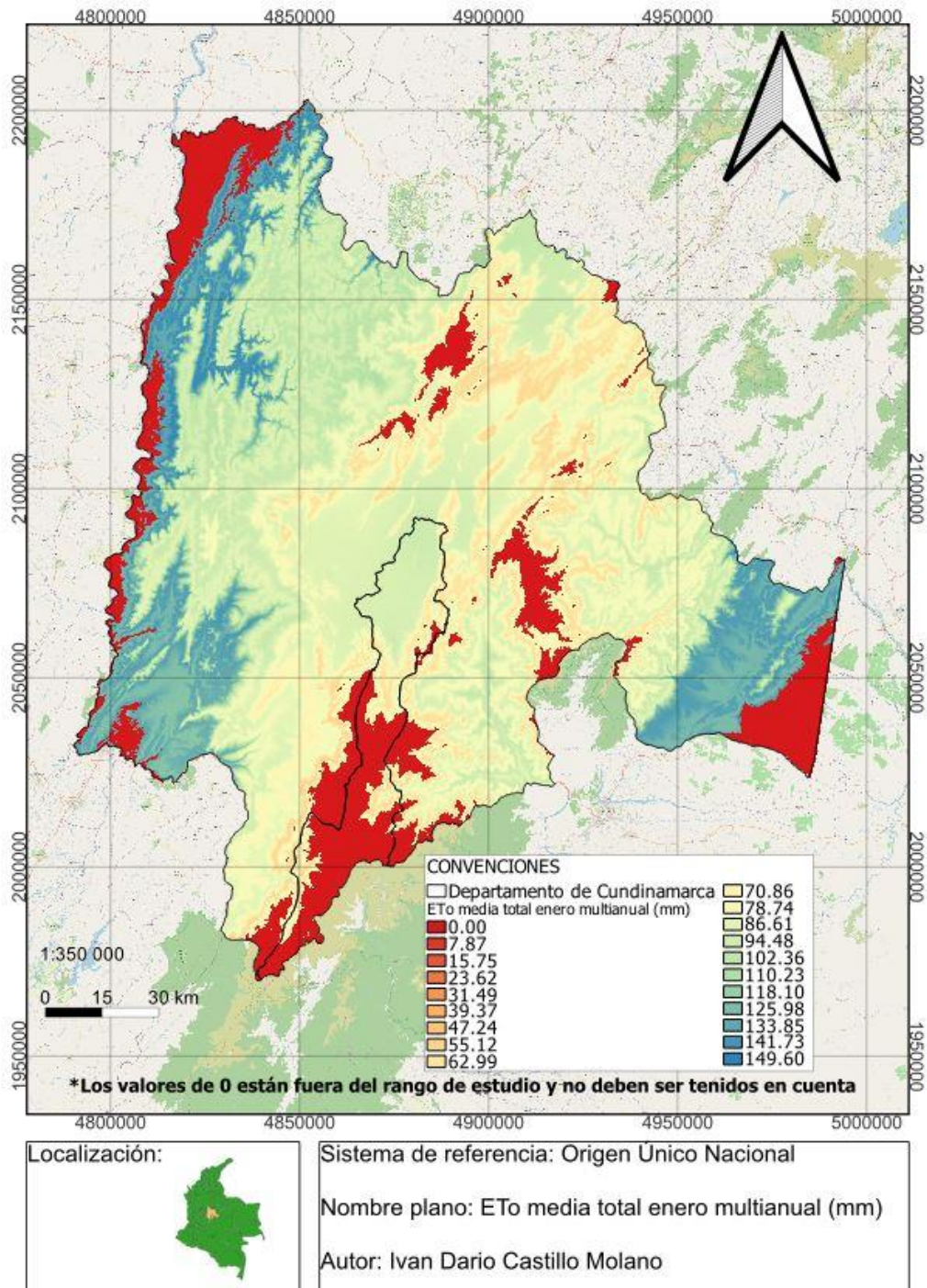


Mapa 35 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de noviembre para el departamento de Cundinamarca

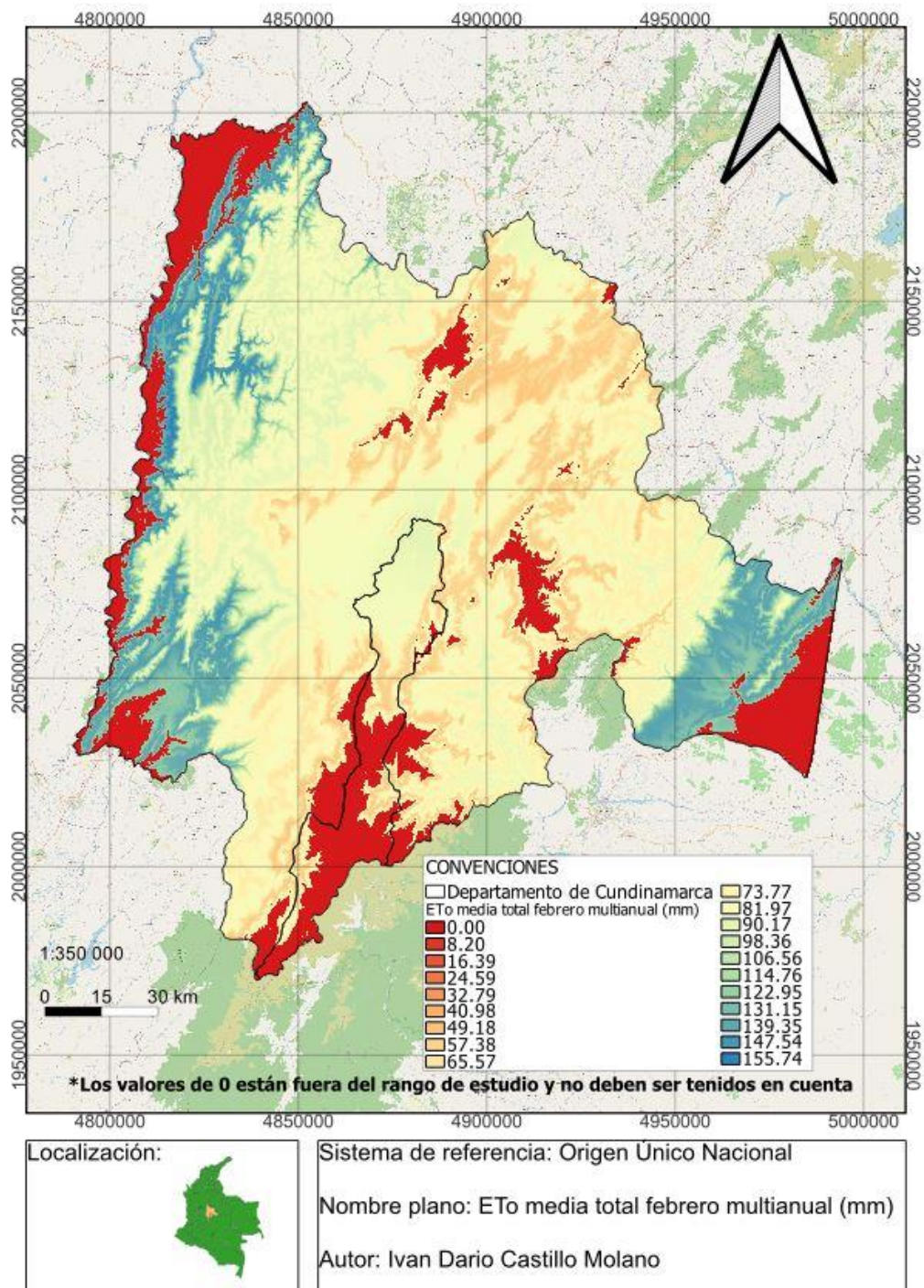


Mapa 36 Coeficientes de relación $k=ETo/Ev$ de diciembre para el departamento de Cundinamarca

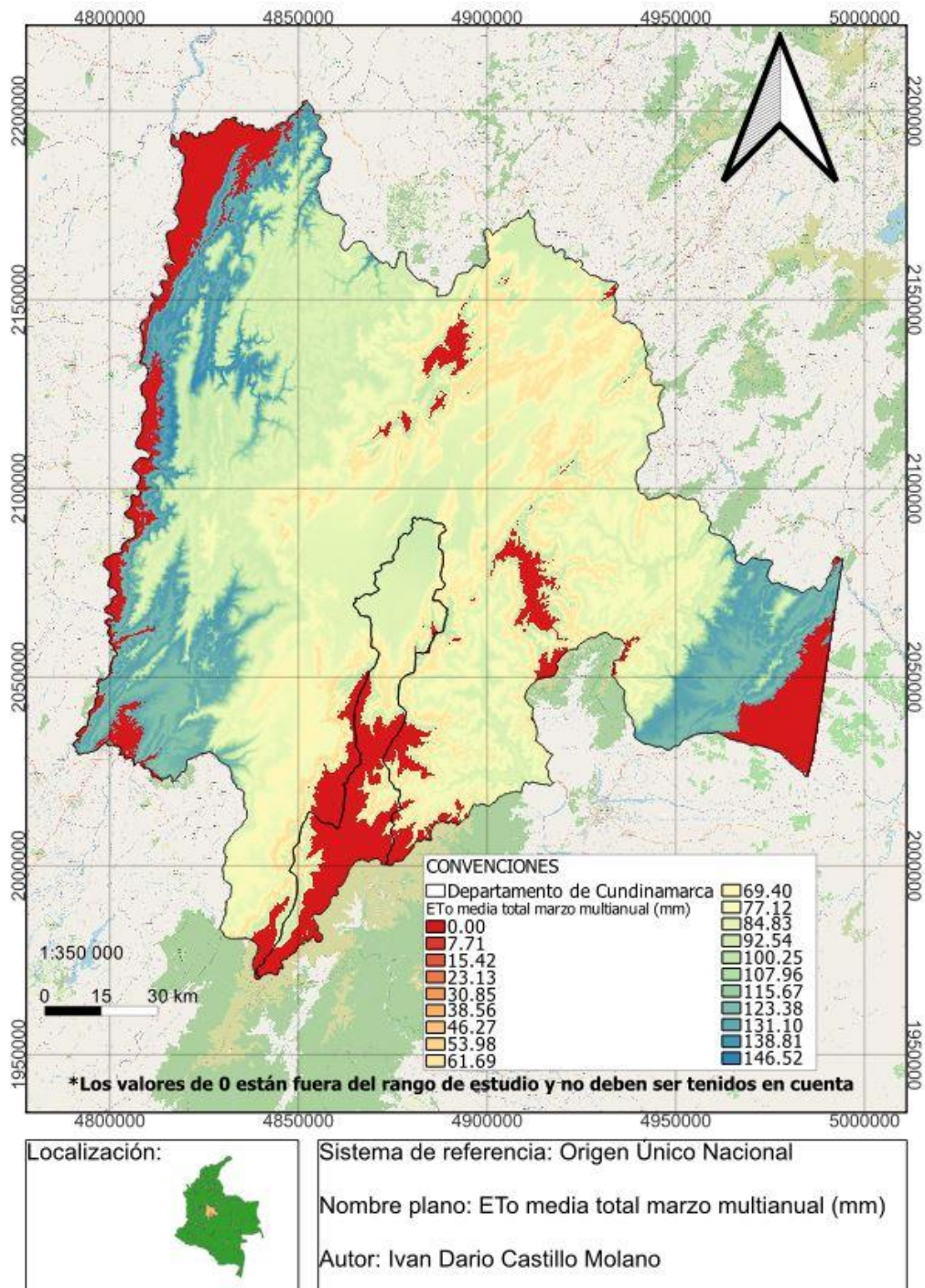
9.8.4 Mapas de ETo



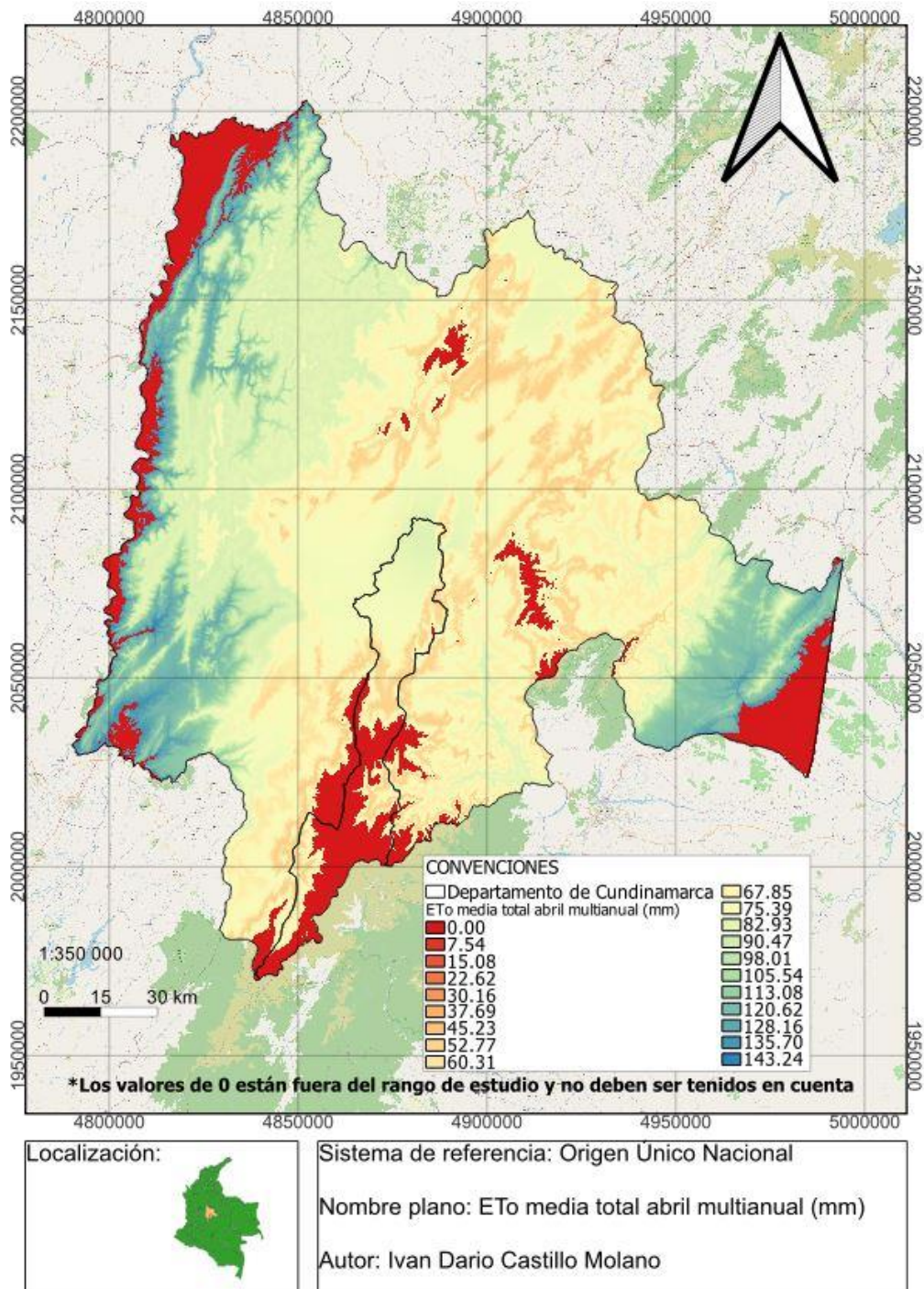
Mapa 37 ETo media total enero multianual para el departamento de Cundinamarca



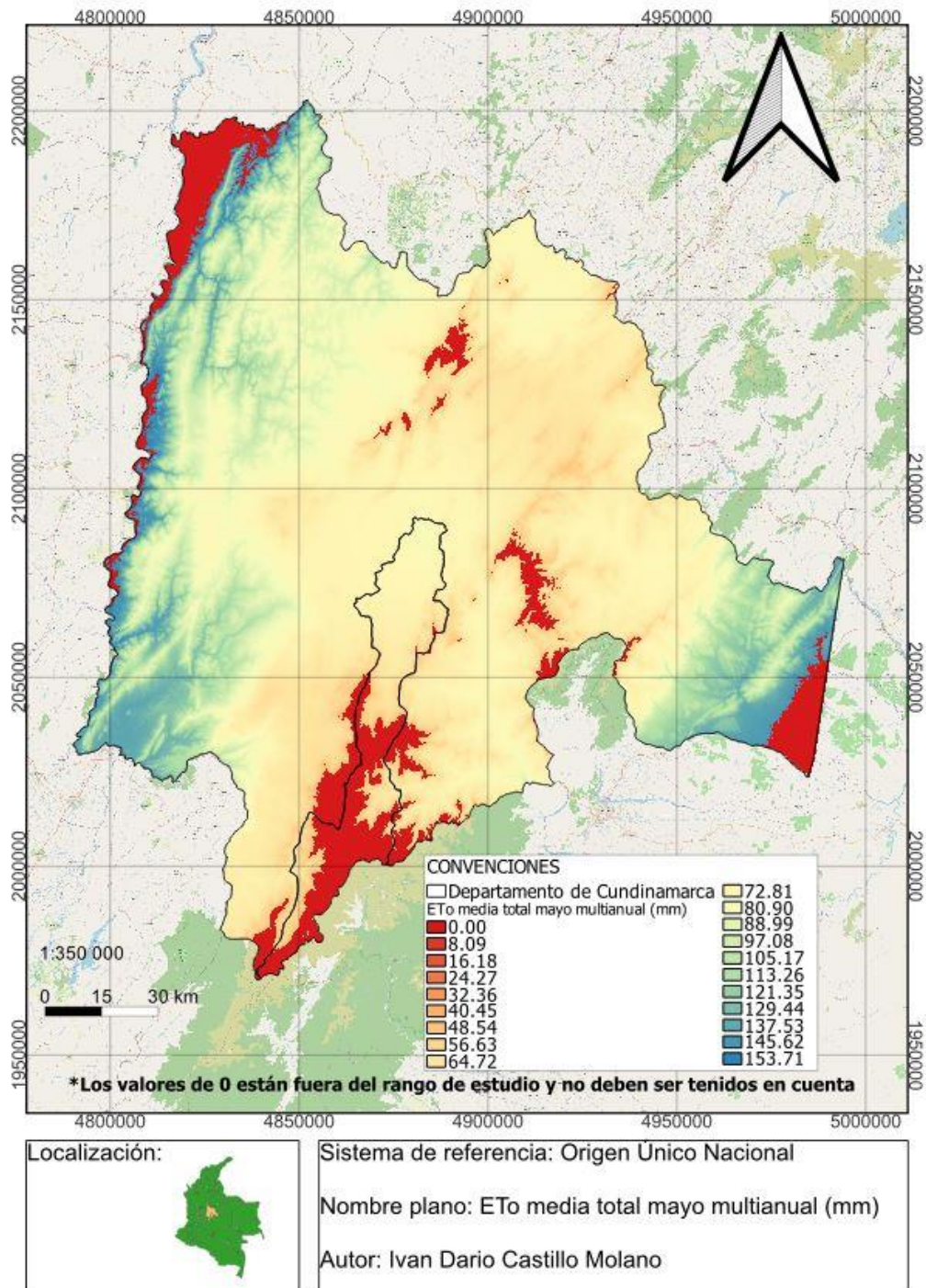
Mapa 38 ETo media total febrero multianual para el departamento de Cundinamarca



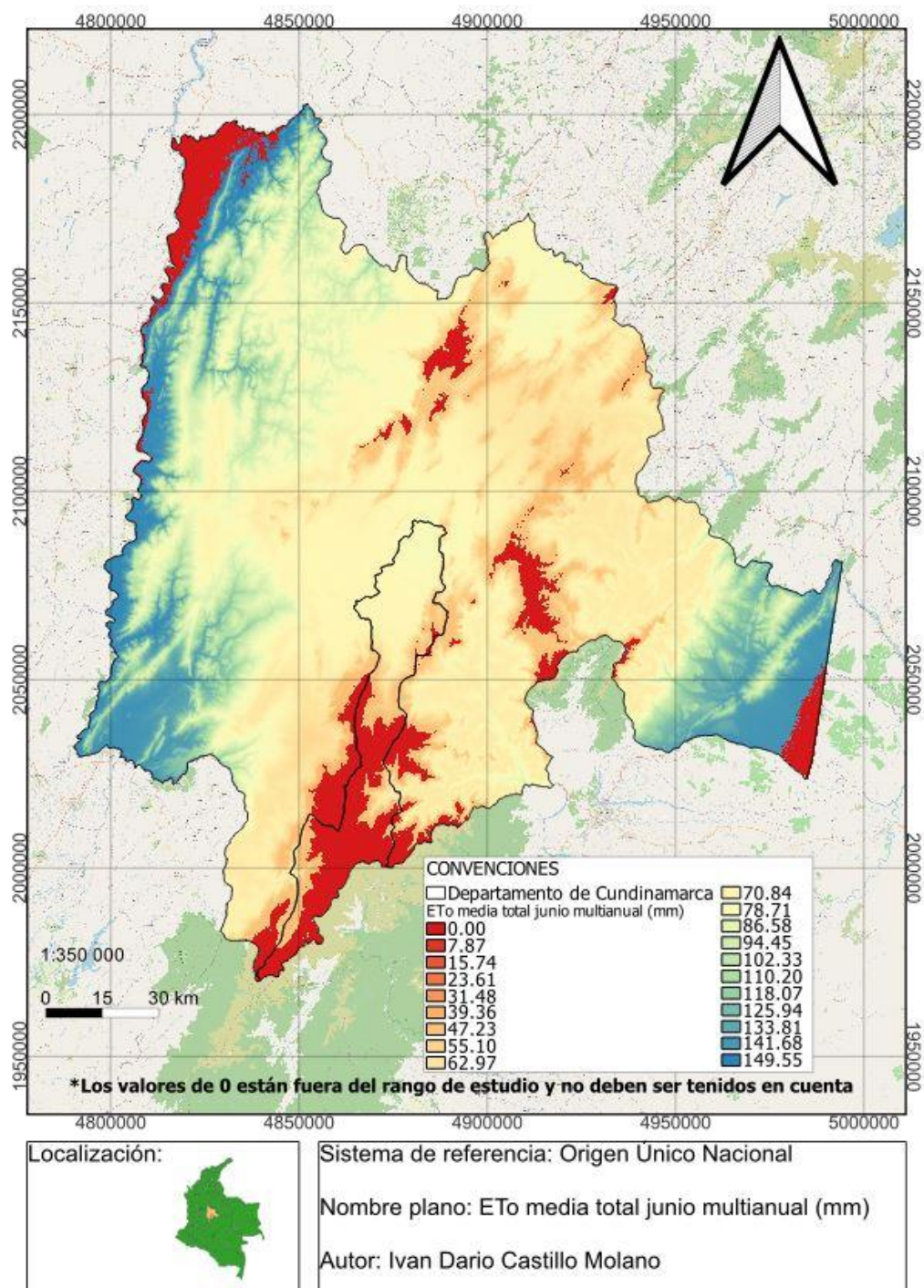
Mapa 39 ETo media total marzo multianual para el departamento de Cundinamarca



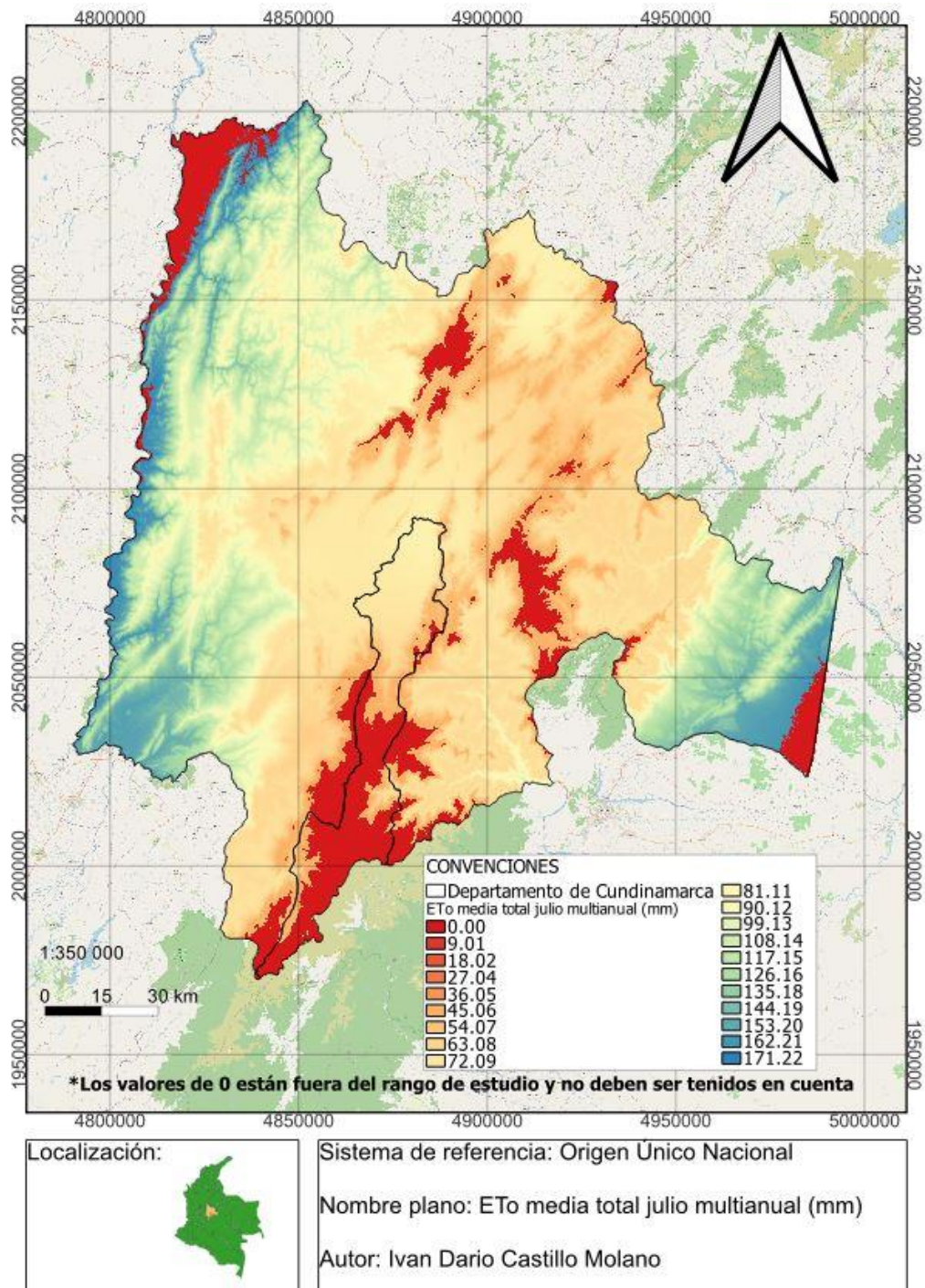
Mapa 40 ETo media total abril multianual para el departamento de Cundinamarca



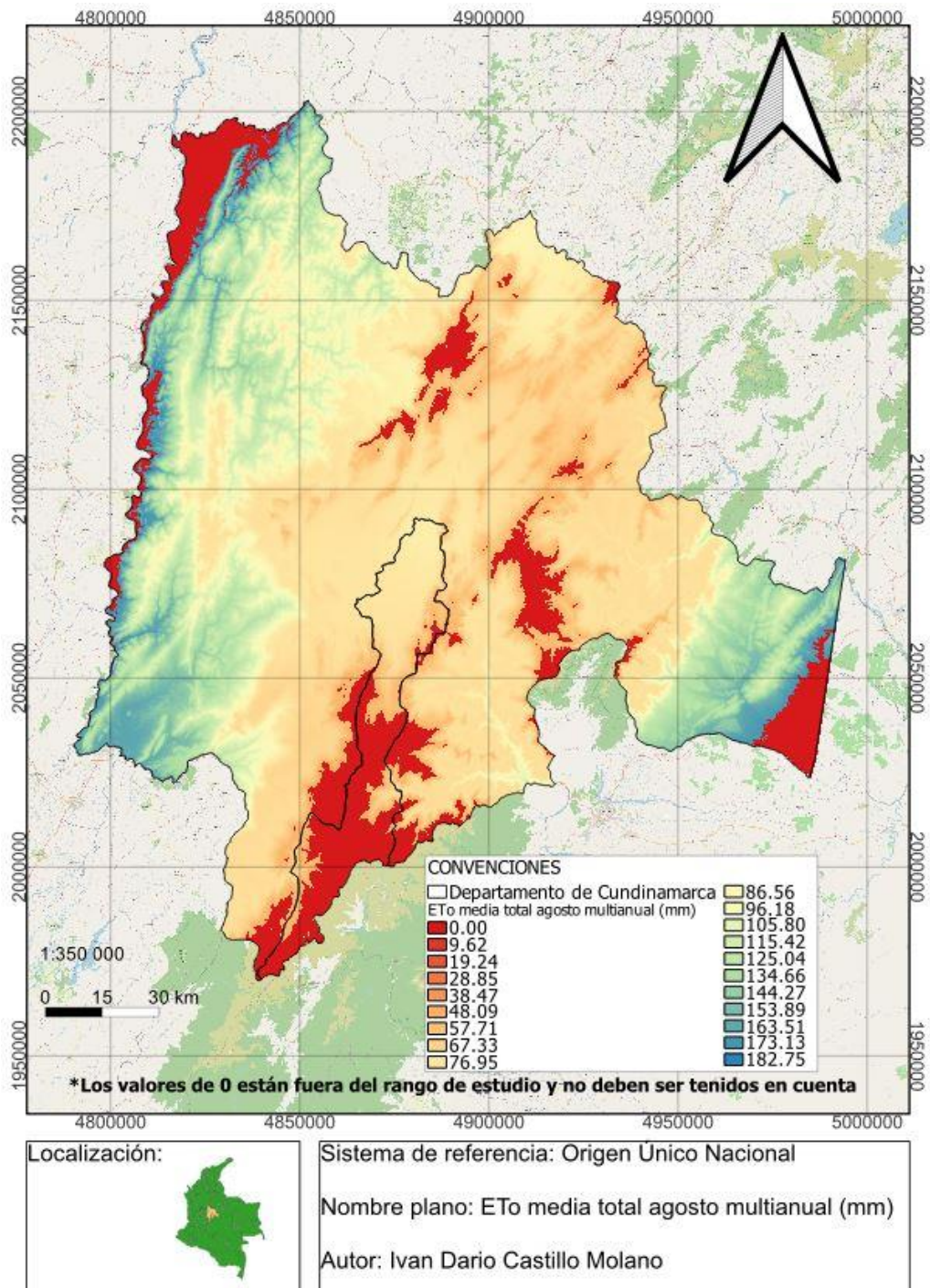
Mapa 41 ETo media total mayo multianual para el departamento de Cundinamarca



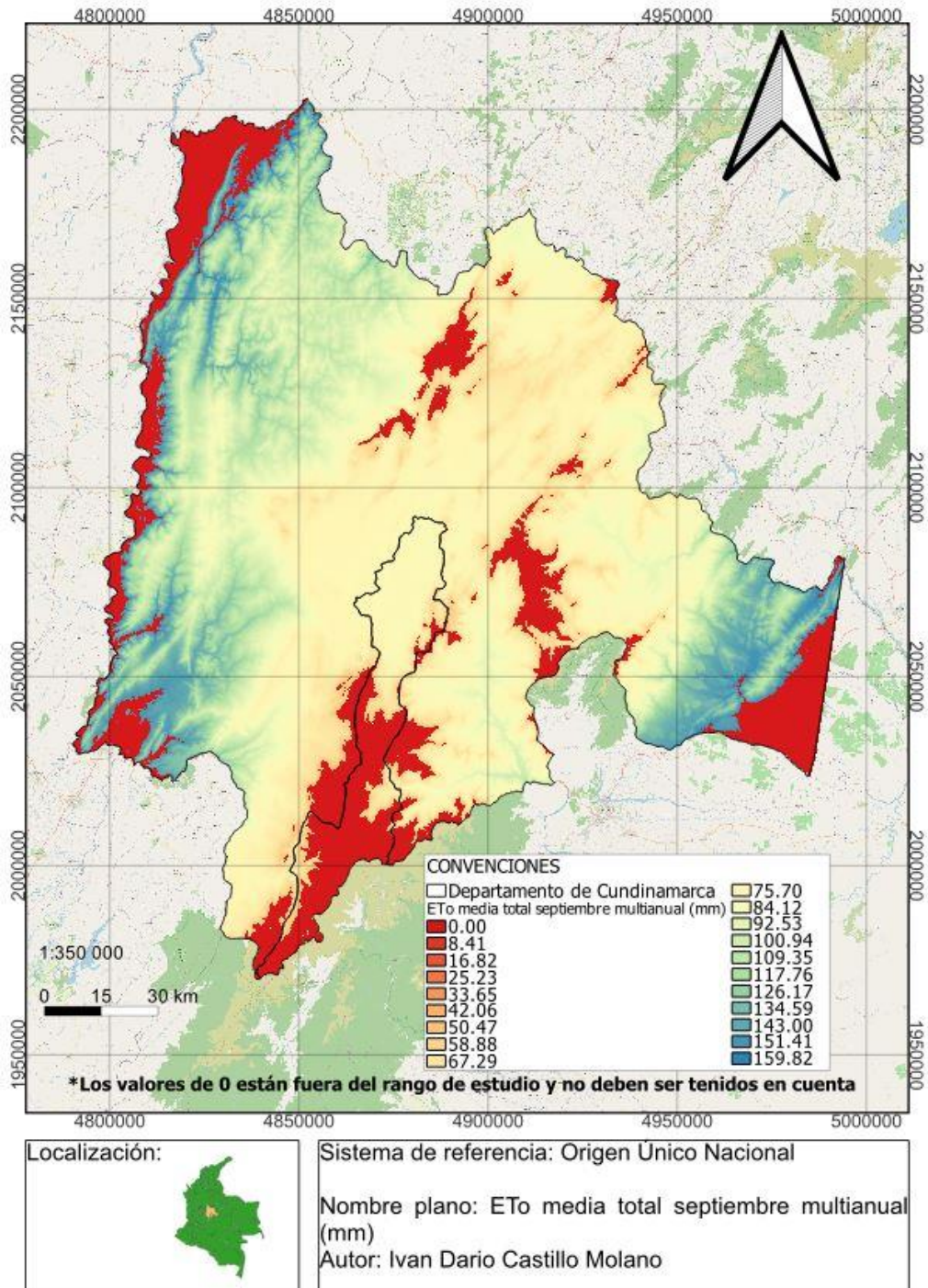
Mapa 42 ETo media total junio multianual para el departamento de Cundinamarca



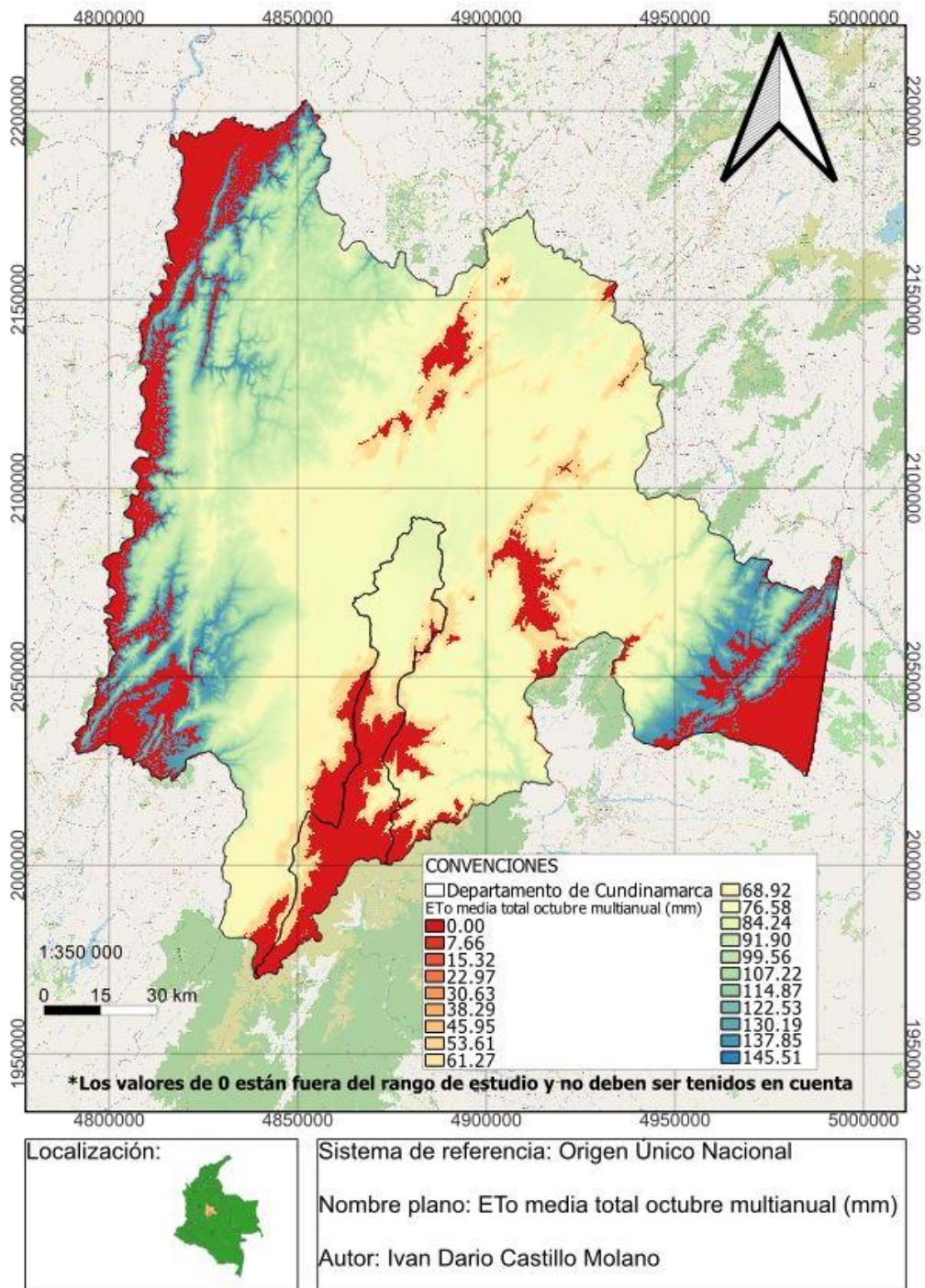
Mapa 43 ETo media total julio multianual para el departamento de Cundinamarca



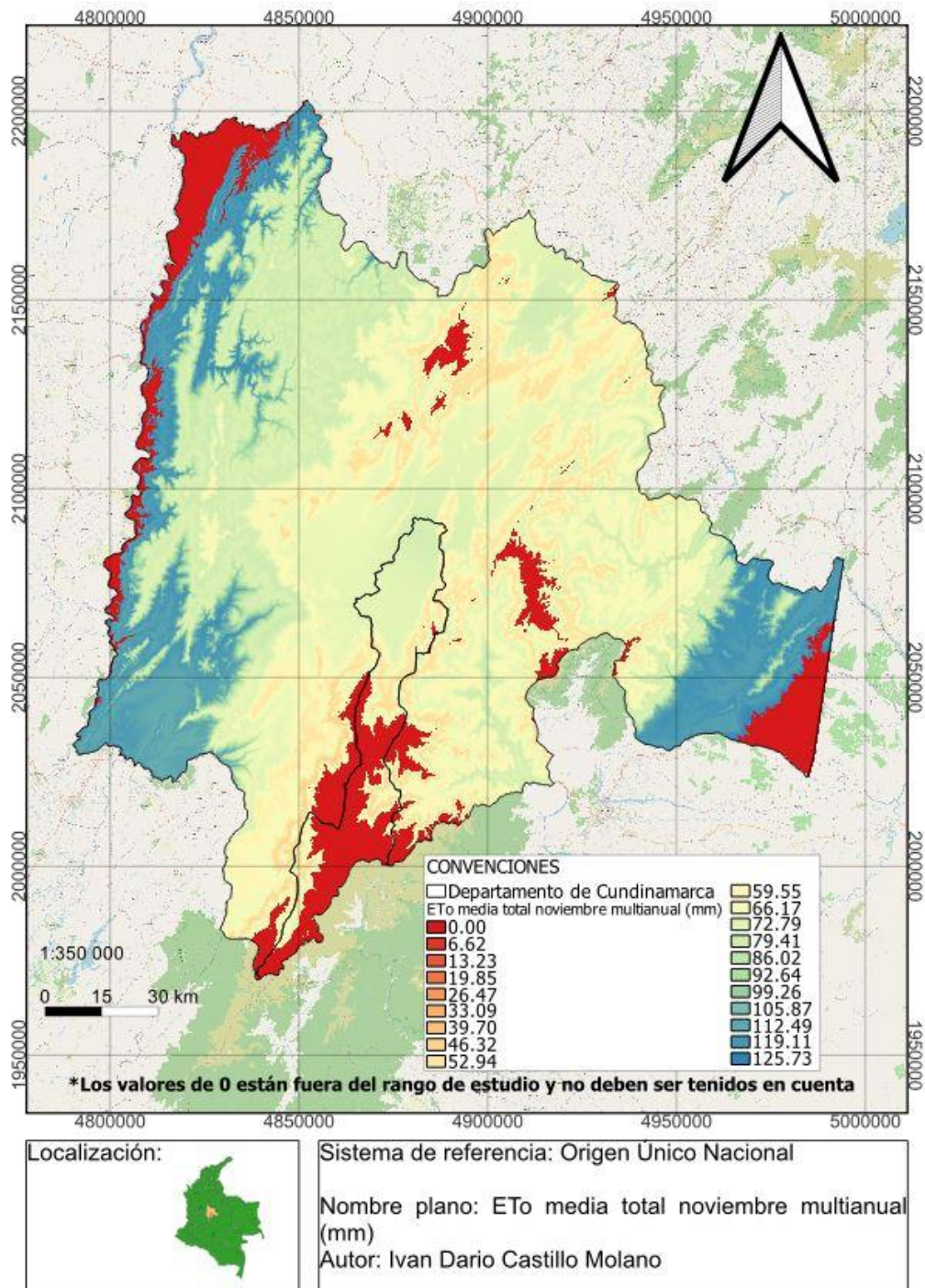
Mapa 44 ETo media total agosto multianual para el departamento de Cundinamarca



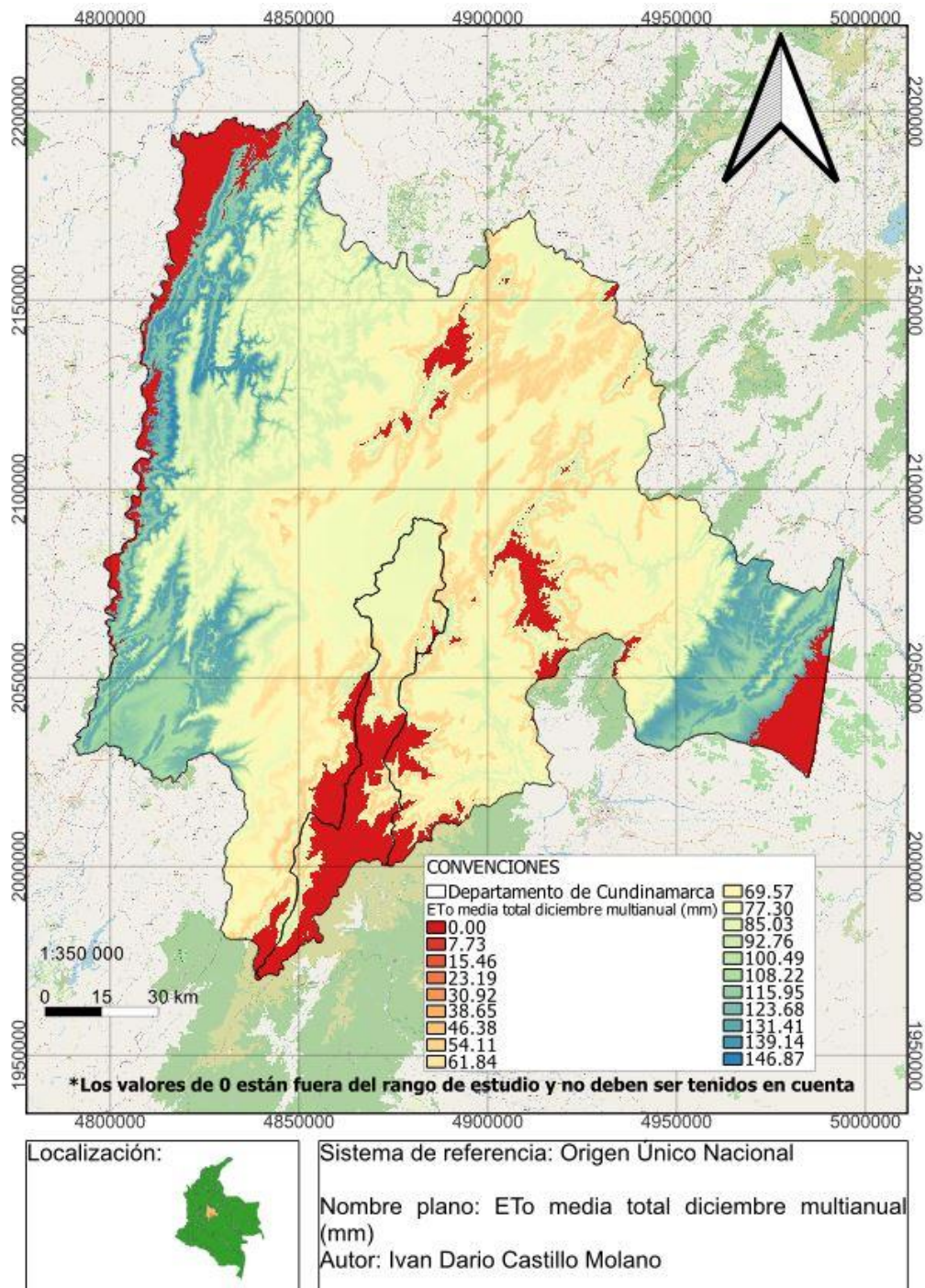
Mapa 45 ETo media total septiembre multianual para el departamento de Cundinamarca



Mapa 46 ETo media total octubre multianual para el departamento de Cundinamarca



Mapa 47 ETo media total noviembre multianual para el departamento de Cundinamarca



Mapa 48 ETo media total diciembre multianual para el departamento de Cundinamarca