

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

EVALUACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE OBSERVACIONES  
DE LA RED METEOROLÓGICA Y PRODUCTOS SATELITALES  
TMPAV7 E IMERGV3 EN EL ÁREA DE INFLUENCIA FONAG-EPMAPS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MENCIÓN HIDRÁULICA

CHRISTIAN SANTIAGO DÍAZ QUILUMBA  
christian-diaz77@hotmail.com

Director: CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS  
carlos.paezb@epn.edu.ec  
Co-Director: XAVIER ZAPATA RÍOS  
xavier.zapata@epn.edu.ec

Quito, Junio 2018

## DECLARACIÓN

Yo, Christian Santiago Díaz Quilumba, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Christian Santiago Díaz Quilumba

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Santiago Díaz Quilumba, bajo mi supervisión.

---

Carlos Sebastián Páez Bimos  
Director del Proyecto

---

Xavier Zapata Ríos  
Co-Director del Proyecto

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres por enseñarme los valores que me han hecho ser una persona de bien, ustedes son mis más grandes ejemplos de honestidad, trabajo y superación.

A mi hermana por todas las alegrías y tristezas, de ti he aprendido mucho.

Por las enseñanzas, la dedicación y el apoyo, agradezco al Dr. Xavier Zapata Ríos, director del proyecto PIJ-15-14, y a todo el equipo.

Al Ing. Sebastián Páez, quien ha sido un excelente director y guía durante este proceso, y siempre me ha brindado su valiosa asistencia.

Al Fondo para la Protección del Agua (FONAG) y a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS) quienes aportaron con la información necesaria para llevar a cabo este proyecto de investigación y sin la cual no habría sido posible realizar.

A todas las personas que aportaron en este trabajo, y a todas las instituciones que facilitaron la información.

A mis queridos amigos y amigas, por la motivación y el cariño.

Finalmente, a la Escuela Politécnica Nacional, que se convirtió en mi segundo hogar, durante estos 5 años.

## DEDICATORIA

A mi familia, porque me dan las fuerzas para seguir adelante.

A mis padres, porque me recuerdan de dónde vengo y son mi principal motivación.

**Christian**

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>xviii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>xx</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>xxii</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>xxiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxv</b>
<b>PRESENTACIÓN</b>	<b>xxvi</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN . . . . .	1
1.2 ANTECEDENTES . . . . .	2
1.3 JUSTIFICACIÓN . . . . .	2
1.4 OBJETIVOS . . . . .	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL . . . . .	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	4
1.5 ESTUDIOS PREVIOS . . . . .	4
<b>2 ESTADO DEL ARTE Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>6</b>
2.1 MARCO TEÓRICO . . . . .	6
2.1.1 PRECIPITACIÓN . . . . .	6
2.1.2 PRODUCTOS SATELITALES . . . . .	8
2.1.3 TRMM . . . . .	8
2.1.3.1 TMPA . . . . .	9
2.1.4 GPM . . . . .	10
2.1.4.1 IMERG . . . . .	11
2.2 ESTADO DEL ARTE . . . . .	13
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO . . . . .	14
2.3.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA . . . . .	15
2.3.1.1 Ubicación y Área de estudio . . . . .	16
2.3.1.2 Politico-Administrativo . . . . .	18
2.3.1.3 Áreas Protegidas . . . . .	19

2.3.1.4	Textura del Suelo	20
2.3.1.5	Taxonomía	21
2.3.1.6	Cobertura Vegetal	22
2.3.1.7	Uso del suelo	22
2.3.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA	23
2.3.2.1	Descripción de las características	23
2.3.2.2	Subcuencas en la zona de estudio	26
2.3.2.3	Análisis de las características	27
2.3.3	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>32</b>
3.1	GENERACIÓN DE BASE PLUVIOMÉTRICA	33
3.1.1	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA	34
3.1.1.1	Información Cartográfica	34
3.1.1.2	Información Pluviométrica	34
3.1.1.3	Información Pluviométrica de los productos satelitales	39
3.1.2	SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS	39
3.1.3	CONTROL DE CALIDAD	44
3.1.4	AGREGACIÓN A NIVEL MENSUAL	45
3.1.5	HOMOGENIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN	45
3.1.5.1	Metodología para detectar series no homogéneas	46
3.1.5.2	Análisis de doble masa	47
3.1.6	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN - PORCENTAJE DE DATOS CON CONTROL DE CALIDAD	48
3.2	MÉTODOS DE RELLENO Y SENSIBILIDAD	49
3.2.1	MÉTODOS DE RELLENO TEMPORALES	49
3.2.1.1	Método de Regresión Lineal Simple	49
3.2.1.2	Método de Regresión Lineal Simple con Productos Satelitales	50
3.2.1.3	Método de Regresión Lineal Múltiple	50
3.2.2	MÉTODOS DE RELLENO ESPACIALES	50
3.2.2.1	IDW (Inverse Distance Weigthing)	50
3.2.2.2	Kriging Ordinario	51
3.2.2.3	Spline Line	53
3.2.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y GENERACIÓN DE ISOYETAS	54
3.2.4	MÉTRICAS ESTADÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RELLENO	54
3.3	ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL	55

3.3.1	EVALUACIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES . . . . .	56
3.3.1.1	Métricas Estadísticas . . . . .	57
3.3.1.2	Índices de Detección . . . . .	58
3.3.2	ESTRUCTURA ESPACIAL . . . . .	60
3.3.3	FUSIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES . . . . .	64
3.3.3.1	Métodos de Corrección . . . . .	64
3.3.3.2	Validación Cruzada . . . . .	67
3.3.3.3	Generación de Isoyetas . . . . .	68
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>69</b>
4.1	GENERACIÓN DE BASE DE DATOS . . . . .	69
4.1.1	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN . . . . .	69
4.1.2	SELECCIÓN DE ESTACIONES . . . . .	73
4.1.3	CONTROL DE CALIDAD . . . . .	80
4.1.4	AGREGACIÓN MENSUAL . . . . .	81
4.1.5	HOMOGENIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN . . . . .	85
4.1.6	RESULTADO DEL ANÁLISIS DE INFORMACIÓN . . . . .	92
4.2	MÉTODOS DE RELLENO . . . . .	96
4.2.1	MÉTODOS DE RELLENO TEMPORALES . . . . .	96
4.2.1.1	Regresión Lineal Simple . . . . .	96
4.2.1.2	Regresión Lineal Simple con TMPA v7 . . . . .	97
4.2.1.3	Regresión Lineal Simple con IMERG v3 . . . . .	99
4.2.1.4	Regresión Lineal Múltiple . . . . .	101
4.2.2	MÉTODOS DE RELLENO ESPACIALES . . . . .	107
4.2.3	RESULTADO DE LA GENERACIÓN DE MAPAS DE PRE- CIPITACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD . . . . .	108
4.2.3.1	Interpolación IDW . . . . .	108
4.2.3.2	Interpolación Kriging . . . . .	111
4.2.4	RESULTADO DE LAS MÉTRICAS ESTADÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RELLENO . . . . .	115
4.3	ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL . . . . .	118
4.3.1	EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL . . . . .	122
4.3.1.1	Métricas Estadísticas o de intensidad de lluvia . . . . .	122
4.3.1.2	Índices de Detección . . . . .	137
4.3.2	ESTRUCTURA ESPACIAL . . . . .	153
4.3.2.1	Correlograma . . . . .	156
4.3.2.2	Semivariograma . . . . .	165

4.3.3	FUSIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES Y GENERACIÓN DE ISOYETAS . . . . .	167
4.3.3.1	TMPA v7 corregido . . . . .	169
4.3.3.2	IMERG v3 corregido . . . . .	171
4.3.3.3	Resultados de la Validación Cruzada . . . . .	173
4.3.3.4	Generación de mapas . . . . .	183
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>187</b>
5.1	CONCLUSIONES . . . . .	187
5.2	RECOMENDACIONES . . . . .	189
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>190</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>196</b>
1	Mapas de la Zona de Estudio	196
2	Precipitación media diaria	207
3	Precipitación Mensual-Estaciones por Subcuenca	241
4	Manual de descarga Mirador	247
5	Manual de descarga Giovanni	252
6	Códigos en R para procesar la información del producto TMPA v7 e IMERG v3	256
7	Mapas Isoyetas con diferentes métodos de relleno	263
8	Tablas Métricas Estadísticas	282
9	Mapas de estimaciones satelitales TMPA v7 sin corregir	290
10	Mapas de estimaciones satelitales IMERG v3 sin corregir	293
11	Estimaciones satelitales mensuales multianuales TMPA v7 corregidas	296
12	Estimaciones satelitales mensuales multianuales IMERG v3 corregidas	305
13	Validación Cruzada - Métodos de Corrección y observaciones campo	314

## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Estaciones meteorológicas activas dentro de la Zona de Influencia EPMAPS-FONAG, comprendida por la parte alta de la Cuenca de Esmeraldas y Napo, 2017 . . . . .	7
2.2	Imagen satelital TMPA de precipitación del mes de Enero de 2016 para el Ecuador . . . . .	10
2.3	Constelación de satélites GPM . . . . .	11
2.4	Imagen satelital IMERG de precipitación del mes de Enero de 2016 para el Ecuador . . . . .	12
2.5	Ubicación de la Zona de Estudio . . . . .	16
2.6	Zonas Diferenciadas del Área de Estudio . . . . .	17
2.7	Lugares de captación de agua, puntos de aforo, proyectos de generación hidroeléctricos y principales sistemas de Agua Potable EPMAPS . . . . .	18
2.8	Subcuencas dentro de la Zona de Influencia FONAG-EPMAPS . . . . .	27
2.9	Temperatura media anual para la zona de estudio . . . . .	30
2.10	Precipitación media anual para la zona de estudio . . . . .	31
3.1	Flujo de procesos para el Objetivo Específico 2 y 3 . . . . .	32
3.2	Flujo de procesos para desarrollar el Objetivo Específico 4 . . . . .	33
3.3	Detección de discontinuidades en la serie de tiempo de anomalía de precipitación de la estación M009, con el paquete RHTest. Serie de tiempo original con control de calidad. . . . .	47
3.4	Homogeneización de la serie de tiempo de la estación M009 con el paquete RHTest . . . . .	47
3.5	Curva de doble masa P42 - P43 . . . . .	48
3.6	Elementos del Semivariograma . . . . .	53
3.7	TMPA sin corregir Año 1998 . . . . .	56
3.8	Ejemplo de Semivariograma para el análisis de estructura espacial . . . . .	60
3.9	Matriz de correlación gráfica . . . . .	61
3.10	Producto Satelital TMPA 3B43 v7 para el año 2002 . . . . .	62
3.11	Número de estaciones por pixel $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ . . . . .	62
3.12	Producto Satelital IMERG v3 para Abril 2014 . . . . .	63
3.13	Número de estaciones por pixel $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$ . . . . .	64
4.1	Clasificación de regímenes de precipitación en la zona de estudio . . . . .	71
4.2	Distribución de las estaciones de precipitación en el DMQ . . . . .	72
4.3	Medias mensuales multianuales (1998-2016) para la subcuenca Antisana . . . . .	79

4.4	Medias mensuales multianuales (1998-2016) para la subcuenca Chalpi Grande . . . . .	79
4.5	Porcentaje de vacíos (%) en estaciones pluviométricas posterior a la agregación mensual . . . . .	85
4.6	Curva de doble masa C11 - P35 . . . . .	87
4.7	Curva de doble masa P72 - Cotocollao . . . . .	87
4.8	Curva de doble masa P09 - P08 . . . . .	88
4.9	Comparación entre los métodos de relleno espaciales (abril-2005) . . . . .	107
4.10	Isoyeta con IDW - datos observados . . . . .	109
4.11	Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de enero con el método de interpolación IDW. . . . .	109
4.12	Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de abril con el método de interpolación IDW. . . . .	110
4.13	Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de junio con el método de interpolación IDW. . . . .	110
4.14	Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de enero con el método de interpolación Kriging . . . . .	111
4.15	Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de abril con el método de interpolación Kriging. . . . .	112
4.16	Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de junio con el método de interpolación Kriging . . . . .	112
4.17	Semivariogramas correspondiente al mes de enero para distintos métodos de relleno . . . . .	113
4.18	Semivariogramas correspondiente al mes de abril para distintos métodos de relleno . . . . .	114
4.19	Semivariogramas correspondiente al mes de junio para distintos métodos de relleno . . . . .	114
4.20	Error Absoluto Medio (MAE) para distintos métodos de relleno . . . . .	115
4.21	Error Medio (ME) para distintos métodos de relleno . . . . .	116
4.22	Error cuadrático medio (RMSE) para distintos métodos de relleno . . . . .	116
4.23	Coefficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para distintos métodos de relleno . . . . .	117
4.24	Estimación satelital TMPA y observaciones de campo del año 2015 . . . . .	118
4.25	Estimación satelital IMERG y observaciones de campo del año 2015 . . . . .	119
4.26	Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Antisana . . . . .	119
4.27	Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Chalpi Grande . . . . .	120

4.28	Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Cinto . . . . .	120
4.29	Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Guayllabamba Alto . . . . .	121
4.30	Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Oyacachi . . . . .	122
4.31	Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Papallacta . . . . .	122
4.32	PBIas % para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	123
4.33	Error medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	124
4.34	Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	125
4.35	Error medio absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	125
4.36	Coefficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	126
4.37	Índice de concordancia ( $d$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	127
4.38	Mapa de PBIas % para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	127
4.39	Mapa de Error Medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	128
4.40	Mapa de Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	128
4.41	Mapa de Error Medio Absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	129
4.42	Mapa de Coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	129
4.43	Mapa de Índice de Concordancia ( $d$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7 . . . . .	130
4.44	PBIas % para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3 . . . . .	131
4.45	Error medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3 . . . . .	131
4.46	Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3 . . . . .	132

4.47	Error medio absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	132
4.48	Coefficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	133
4.49	Índice de concordancia ( $d$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	134
4.50	Mapa de PBias % para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	134
4.51	Mapa de Error Medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	135
4.52	Mapa de Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	135
4.53	Mapa de Error Medio Absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	136
4.54	Mapa de Coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	136
4.55	Mapa de Índice de Concordancia ( $d$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3	137
4.56	Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición	138
4.57	Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal	139
4.58	Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición	140
4.59	Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal	141
4.60	Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición	142
4.61	Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal	143

4.62	Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición . . . . .	144
4.63	Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal . . . . .	145
4.64	Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición . . . . .	146
4.65	Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal . . . . .	147
4.66	Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición . . . . .	148
4.67	Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal . . . . .	149
4.68	Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición . . . . .	150
4.69	Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal . . . . .	151
4.70	Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición . . . . .	152
4.71	Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal . . . . .	153
4.72	Densidad de cobertura de estaciones pluviométricas(R= 28km) . . . . .	154
4.73	Densidad de cobertura de estaciones pluviométricas(R= 10km) . . . . .	155
4.74	Densidad de cobertura de estaciones pluviométricas(R= 5km) . . . . .	156
4.75	Correlograma para la subcuenca Antisana . . . . .	157
4.76	Correlograma para la subcuenca Chalpi Grande . . . . .	158
4.77	Correlograma para la subcuenca Cinto . . . . .	159
4.78	Correlograma para la subcuenca Guayllabamba Medio . . . . .	160
4.79	Correlograma para la subcuenca Oyacachi y Papallacta . . . . .	161

4.80	Correlograma para la subcuenca Pisque y Pita . . . . .	162
4.81	Correlograma para la subcuenca San Pedro . . . . .	163
4.82	Correlación espacial para cada producto a distintas resoluciones espaciales . . . . .	164
4.83	Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Enero . . . . .	165
4.84	Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Abril . . . . .	166
4.85	Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Junio . . . . .	166
4.86	Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Agosto . . . . .	167
4.87	Distribución Normal para observaciones de pluviómetros correspondientes al mes de abril . . . . .	168
4.88	Distribución Normal para observaciones de pluviómetros correspondientes al mes de octubre . . . . .	168
4.89	Producto TMPA corregido por KED, BC, MBC, DS para Febrero. Estación $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto TMPA (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing) . . . . .	169
4.90	Producto TMPA corregido por KED, BC, MBC, DS para Abril. Estación $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto TMPA (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing) . . . . .	170
4.91	Producto TMPA corregido por KED, BC, MBC, DS para Junio. Estación $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto TMPA (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing) . . . . .	171
4.92	Producto IMERG corregido por KED, BC, MBC, DS para Abril. Estación $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$ (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto IMERG (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing) . . . . .	172

4.93	Producto IMERG corregido por KED, BC, MBC, DS para Junio. Estación $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$ (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto IMERG (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing)	173
4.94	Correlación datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada	174
4.95	RMSE datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada	175
4.96	ME datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada	176
4.97	MAE datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada	177
4.98	Correlación datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada	178
4.99	RMSE datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada	179
4.100	ME datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada	180
4.101	MAE datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada	181
4.102	Precipitación media mensual multianual de productos satelitales corregidos con DS	183
4.103	Mapa de precipitación satelital TMPA v7 corregida con el método de corrección DS	185
4.104	Mapa de precipitación satelital IMERG v3 corregida con el método de corrección DS	186
7.1	Interpolación IDW	264
7.2	Interpolación Kriging	270
7.3	Semivariogramas utilizados para la Interpolación Kriging	276
11.1	Producto Satelital TMPA v7 corregido - Base Relleno Regresión Lineal Simple	297
11.2	Producto Satelital TMPA v7 corregido - Mapa de Isoyetas de Precipitación Media Mensual Multianual	301
12.1	Producto Satelital IMERG v3 corregido - Base Relleno Regresión lineal Simple	306

12.2	Producto Satelital IMERG v3 corregido - Mapa de Isoyetas de Precipitación Media Mensual Multianual	310
13.1	Indices de la Validación Cruzada - Base Relleno Regresión Lineal Simple y TMPA v7	315
13.2	Indices de la Validación Cruzada - Base Relleno Regresión Lineal Simple e IMERG v3	317

## ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Estudios Similares IMERG - TMPA . . . . .	5
2.1	Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones ( <i>km<sup>2</sup>/estación</i> ) . . . . .	8
2.2	Cuadro Comparativo TMPA e IMERG . . . . .	13
2.3	Información cartográfica utilizada en el proyecto para caracterizar la zona . . . . .	15
2.4	Área de la zona de estudio correspondiente a cada cantón . . . . .	19
2.5	Área de la zona de estudio correspondiente a las áreas naturales protegidas . . . . .	19
2.6	Área de la zona de estudio correspondiente a los bosques protectores . . . . .	20
2.7	Área de la zona de estudio correspondiente a la textura del suelo . . . . .	21
2.8	Área de la zona de estudio correspondiente a la taxonomía del suelo . . . . .	21
2.9	Área de zona de estudio correspondiente a la cobertura vegetal . . . . .	22
2.10	Área de la zona de estudio correspondiente a los usos del suelo . . . . .	23
2.11	Subcuencas de la Zona de estudio . . . . .	26
2.12	Propiedades físicas de las subcuencas dentro de la zona de estudio . . . . .	28
3.1	Información cartográfica utilizada para el proyecto . . . . .	34
3.2	Resolución y temporalidad de Estaciones según la Institución . . . . .	35
3.3	Ubicación de todos los pluviómetros al inicio de la recopilación. . . . .	35
3.4	Criterio de clasificación de estaciones según datos . . . . .	40
3.5	Ubicación de los pluviómetros empleados para realizar la evaluación de la distribución espacio-temporal de la precipitación. . . . .	40
3.6	Resolución temporal para distintos pluviómetros . . . . .	45
3.7	Significado colores . . . . .	49
3.8	Tabla de contingencia . . . . .	58
3.9	Matriz de Correlación - Distancia para las estaciones pluviométricas en la zona de estudio . . . . .	61
4.1	Precipitación mensual de datos observados por las estaciones pluviométricas. . . . .	69
4.2	Precipitación media mensual multianual de datos observados por las estaciones pluviométricas. . . . .	70
4.3	Precipitación mensual de datos satelitales TMPA v7. . . . .	73
4.4	Clasificación según calidad de información diaria de precipitación . . . . .	73
4.5	Tipo de Régimen de precipitación . . . . .	78
4.6	Clasificación de estaciones por subcuenca . . . . .	80
4.7	Control de calidad y conversión para la estación P08 . . . . .	80
4.8	Tabla resumen de control de calidad para estaciones pluviométricas . . . . .	81

4.9	Disponibilidad de Información a nivel mensual . . . . .	81
4.10	Pares de Estaciones con Información Pluviométrica que fueron corregidas mediante las curvas de doble masa . . . . .	86
4.11	Datos obtenidos después del proceso de homogenización . . . . .	88
4.12	Clasificación según calidad de información pluviométrica . . . . .	92
4.13	Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple . . . . .	96
4.14	Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con TMPA v7 . . . . .	97
4.15	Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con IMERG v3 . . . . .	99
4.16	Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Múltiple . . . . .	101
4.17	Cantidad de datos rellenados a nivel mensual mediante métodos temporales . . . . .	103
4.18	Media mensual de precipitación producto del Relleno Spline ( <i>mm/mes</i> ) . . . . .	108
4.19	Resumen de métricas estadísticas para los métodos de relleno empleados. . . . .	117
4.20	Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Antisana . . . . .	157
4.21	Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Chalpi Grande . . . . .	158
4.22	Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Cinto . . . . .	159
4.23	Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Guayllabamba Medio . . . . .	160
4.24	Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Oyacachi y Papallacta . . . . .	161
4.25	Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Pisque y Pita . . . . .	162
4.26	Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca San Pedro . . . . .	163
4.27	Radio de Influencia por subcuenca . . . . .	165
4.28	Resultado de los índices calculados en la validación cruzada para el producto satelital TMPA v7 . . . . .	181
4.29	Resultado de los índices calculados en la validación cruzada para el producto satelital IMERG v3 . . . . .	182

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>d</i>	Índice de concordancia
<i>A</i>	Área de drenaje de la cuenca
<i>BC</i>	Bayesian Combination
<i>Dd</i>	Densidad de drenaje
<i>DS</i>	Double-Kernel Smoothing
<i>ETS</i>	Probabilidad de detección corregida
<i>FAR</i>	False alarm rate (Falsa Alarma)
<i>FBI</i>	Índice de Frecuencia de sesgo
<i>He</i>	Número de detecciones de precipitación
<i>Kc</i>	Índice de Gravelius
<i>KED</i>	Kriging With External Drift
<i>Kf</i>	Factor de forma
<i>L</i>	Longitud del cauce principal
<i>l</i>	Extensión media de la escorrentía superficial
<i>La</i>	Longitud del valle del río principal
<i>Lt</i>	Longitud total de las corrientes
<i>MAE</i>	Mean Absolute Error (Error Medio Absoluto)
<i>MBC</i>	Mean Bias Correction
<i>ME</i>	Mean Error (Error Medio)
<i>OK</i>	Ordinary Kriging (Kriging Ordinario)
<i>P</i>	Perímetro de la cuenca
<i>PBIAS%</i>	Sesgo Relativo
<i>POD</i>	Probabilidad de detección

$P_p$	Estimación observada por el pluviómetro
$P_s$	Estimación del producto satelital
$r$	Coefficiente de correlación de Pearson
$RMSE$	Root Mean Square Error (Raíz del error medio al cuadrado)
$S$	Sinuosidad de las corrientes de agua

## LISTA DE ABREVIATURAS

**EPMAPS** Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento

**EPN** Escuela Politécnica Nacional

**GPCC** Global Precipitation Climatology Centre

**GPM** Global Precipitation Measurement Mission

**IDW** Inverse Distance Weighted

**IGEPN** Instituto Geofísico- EPN

**IGM** Instituto Geográfico Militar

**IMERG** Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM

**IMHEA** Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos

**INAMHI** Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

**INEC** Instituto Nacional de Estadística y Censos

**INECEL** Instituto Ecuatoriano de Electrificación

**IR** Infrarrojo

**JAXA** Japan Aerospace Exploration Agency

**MAE** Ministerio del Ambiente

**MAGAP** Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca

**MTOP** Ministerio de Transporte y Obras Públicas

**NASA** National Aeronautics and Space Administration

**PIJ** Proyecto Interdisciplinario Junior

**PMW** Passive Microwave

**PRONAREG** Dirección de Regionalización Agraria

**RADAR** Radio Detection and ranging

**SA** Secretaria del Ambiente

**SIG** Sistema de Información Geográfica

**SIGAGRO** Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria

**SNI** Sistema Nacional de Información

**SRTM** Shuttle Radar Topography Mission

**TMPA** TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis

**TRMM** Tropical Rainfall Measuring Mission

## RESUMEN

El presente estudio técnico contempla una evaluación de la precipitación para la zona que comprende toda el área de influencia de trabajo de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) y el Fondo para la Protección del Agua (FONAG). Con el fin de realizar este trabajo se han analizado tanto datos observados de la red meteorológica como datos satelitales de los productos TMPA v7 e IMERG v3 que han sido utilizados en estudios similares. Con este análisis se ha determinado que se presentan distintos regímenes de precipitación: un régimen unimodal propio de las subcuencas que dan a la región amazónica, un régimen de precipitación bimodal ya que presenta dos picos en el año y un régimen de transición presente en la subcuenca de Antisana.

Como parte del trabajo ha sido necesario recopilar y validar los datos de precipitación a nivel horario, diario y mensual de la red pluviométrica del Fondo para la Protección del Agua (FONAG), la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (IMHEA) y la Secretaría del Ambiente (SA). Se generó una base de datos desde 1998 a 2016. Luego de comprobar la escasez de información en las series de precipitación se emplean distintos métodos para rellenar las series temporales así como los datos satelitales de los productos TMPA v7 e IMERG v3. A partir de la creación de la base de datos rellenos se consiguió un período de 19 años de información pluviométrica. Se generaron isoyetas de precipitación media mensual multianual. Se evaluó cada método de relleno y se determinó que el método de regresión lineal simple produce errores menores.

Se realiza un análisis espacio-temporal de la precipitación mediante el cálculo de métricas estadísticas, índices de detección, análisis de la estructura espacial y fusión con productos satelitales. El análisis espacial de la precipitación permitió definir las zonas donde ocurren los mayores sesgos y correlación con los productos satelitales. El análisis temporal de la precipitación permitió definir las zonas donde ocurren mayores concordancias entre los pluviómetros y productos satelitales. Sin embargo, la precipitación estimada por los productos satelitales para la zona de estudio es mayor que la precipitación estimada con los pluviómetros, lo que indica una sobre-estimación. Se determinó que en las estaciones pluviométricas del valle se puede utilizar productos satelitales y que el producto IMERG v3 produce menores errores. Los productos satelitales no capturan el régimen unimodal de algunas subcuencas. En la subcuenca de Papallacta los errores se reducen significativamente. La subcuenca de San Pedro tiene un radio de influencia de 5 *km* y es el único que se ajusta a la teoría. Los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 se corrigieron mediante las técnicas de corrección MBC, BC, KED y DS. Y se concluyó que DS produce los errores más pequeños y tiene la correlación más alta.

**Palabras clave:** Precipitación, productos satelitales de precipitación, TMPA, IMERG, FONAG, EPMAPS.

## ABSTRACT

The present technical study evaluates monthly precipitation for the Metropolitan Public Company of Drinkable Water and Sanitation (EPMAPS) and the Quito's Water Fund (FONAG) area of work. We have analyzed observed data from the existing meteorological network and satellite data from the TMPA v7 and IMERG v3 products that have been used in similar studies. With this analysis, it has been determined that different precipitation regimes are present: a unimodal regime typical of the sub-basins that give the Amazon region, a bimodal precipitation regime because it presents two maximums in the year and a transition regime present in the sub-basin of Antisana.

As part of this project, it has been collected and validated precipitation data at hourly, daily and monthly time steps of the rainwater network of the Quito's Water Fund (FONAG), the Metropolitan Public Company of Drinkable Water and Sanitation (EPMAPS), the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI), the Regional Initiative for Hydrological Monitoring of Andean Ecosystems (IMHEA) and the Environmental Secretary from Quito (SA). A database was generated from 1998 to 2016. After checking the insufficiency of information in the precipitation series, different methods are used to fill the time series as well as the satellite data of the TMPA v7 and IMERG v3 products. From the creation of the filled database a period of 19 years of rainfall information was achieved. Isoyetas of multi-year monthly mean precipitation were generated. Each filling method was evaluated and it was determined that the simple linear regression method produces minor errors.

A spatio-temporal analysis of precipitation is performed by calculating statistical metrics, detection rates, analysis of spatial structure and fusion with satellite products. The spatial analysis of precipitation allowed defining the areas where the greatest biases and correlation with satellite products occur. The temporal analysis of the precipitation allowed to define the zones where greater concordances between rain gauges and satellite products occur. However, the precipitation estimated by the satellite products for the study area is greater than the precipitation estimated with the rain gauges, which indicates an over-estimation. It was determined that in the rainfall stations of the valley satellite products can be used and that the IMERG v3 product produces minor errors. Satellite products do not capture the unimodal regime of some sub-basins. In the Papallacta sub-basin, errors are significantly reduced. The sub-basin of San Pedro has a radius of influence of 5 km and it is the only one that fits the theory. The TMPA v7 and IMERG v3 satellite products were corrected using the correction techniques MBC, BC, KED and DS. And it was concluded that DS produces smaller errors and has the highest correlation.

**Key words:** Precipitation, precipitation satelital products, TMPA, IMERG, FONAG, EPMAPS.

## PRESENTACIÓN

En este proyecto de titulación se realiza un análisis espacio-temporal de la precipitación dentro de la zona de influencia de FONAG-EPMAPS, que corresponde a la parte alta de las cuencas de los ríos Esmeraldas y Napo. Esta propuesta consiste en generar una base de datos entre 1998 y 2016 con control de calidad y además se investiga el uso potencial de los productos de las misiones GPM y TRMM, TMPA v7 e IMERG v3, respectivamente. Se compara la precipitación satelital con observaciones en sitio con el fin de complementar la distribución espacial de las observaciones de la red meteorológica, debido a que la precipitación se torna variable esencialmente por las condiciones topográficas de los Andes ecuatorianos. Dentro de este contexto, las imágenes satelitales pueden ser de gran utilidad para estimar la precipitación. Sin embargo, estos productos requieren una evaluación que permitan dar a conocer su alcance y aplicaciones en la zona de estudio. Para lo cual se empleó información de varias estaciones con datos de precipitación de distintas instituciones que son tomados a diferente resolución temporal.

La necesidad de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS) como institución encargada de asegurar el abastecimiento de agua para una población en constante crecimiento es contar con una base de datos de precipitación de alta calidad que permita poner en práctica proyectos de dotación del recurso. Por otro lado, el Fondo para la protección del Agua (FONAG) busca el fortalecimiento de la investigación y el uso de tecnología apropiada para alcanzar la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). La participación activa, responsable y solidaria conlleva al manejo sustentable y sostenible del agua, por lo cual requiere de datos y estudios que representen de forma acertada la climatología de la zona, que le permitan cumplir con la misión que tiene como institución.

En el **capítulo 1** se presenta la introducción, justificación y objetivos del proyecto de titulación que forma parte del proyecto de investigación (PIJ-15-14) titulado "EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN POTENCIAL DE LA PRECIPITACIÓN SATELITAL OBTENIDA DE LA MISIÓN - GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT (GPM) - A LA GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL ECUADOR". Este proyecto se desarrolla como parte del convenio interinstitucional tripartito entre la EPMAPS, FONAG y EPN firmado en el año 2016.

En el **capítulo 2** se presenta el estado del arte y caracterización de la zona de estudio.

En el **capítulo 3** se presenta la metodología empleada para la recopilación, procesamiento, relleno y validación de datos de precipitación, análisis espacio-temporal y corrección de los productos satelitales.

En el **capítulo 4** se presenta los resultados del análisis espacial y temporal de precipitación, sensibilidad de los métodos empleados para el relleno de los datos, validación de los datos y generación de isoyetas con datos observados y satelitales.

Finalmente, en el **capítulo 5** se presentan las conclusiones y recomendaciones.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, la precipitación y demás variables hidrometeorológicas han sido poco estudiadas debido a la falta de inversión de recursos en la implementación y mantenimiento estaciones de monitoreo [Campozano et al., 2016]. Esta situación se manifiesta en la red nacional de estaciones meteorológicas del INAMHI que no cuentan con la densidad de cobertura mínima sugerida por la Organización Meteorológica Mundial [NO168, 2008] de  $250 \text{ km}^2/\text{estación}$  para zonas montañosas,  $575 \text{ km}^2/\text{estación}$  para zonas de planicies internas y  $900 \text{ km}^2/\text{estación}$  para zonas costeras. Especialmente, esta situación es evidente en la región amazónica, al norte de la región costera y en la mayoría de provincias de la región interandina [Organización Meteorológica Mundial, 2009]. La densidad obtenida con estaciones de diferentes entidades en la zona de estudio con una serie de datos de más de 10 años es  $150 \text{ km}^2/\text{estación}$ . Lo que representa una alta densidad de estaciones meteorológicas localizadas, la mayoría (58 %) más arriba de los 3000 metros de elevación.

Esta propuesta investiga el uso potencial de los datos de precipitación de las misiones GPM y TRMM en la zona de intervención de EPMAPS y FONAG. Este estudio se desarrolla en una zona con una densidad alta de estaciones meteorológicas especialmente en las zonas del valle interandino pero limitadas en elevaciones sobre los 3000 metros. El propósito es evaluar la posibilidad que las estimaciones de precipitación de las misiones satelitales antes indicadas puedan ser utilizadas como un complemento a la red meteorológica instalada en el sitio. Las estimaciones de precipitación satelitales pueden ser corregidas por sesgo con datos de precipitación generados por una red de estaciones pluviométricas con datos de calidad. Al reconocer las limitaciones en cobertura espacial de los pluviómetros, los productos TMPA v7 e IMERG v3 pueden ser de gran utilidad. La evaluación permitirá conocer los alcances y aplicaciones de estos productos específicamente en la zona de influencia EPMAPS-FONAG. En caso de que la evaluación de los productos satelitales resulte confiable, se podrá utilizar dichos productos en donde la red de estaciones pluviométricas sea escasa o nula [Campozano et al., 2015].

El presente proyecto de titulación forma parte del proyecto de investigación inter y multidisciplinario de la Escuela Politécnica Nacional (PIJ-15-14) titulado "EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN POTENCIAL DE LA PRECIPITACIÓN SATELITAL OBTENIDA DE LA MISIÓN - GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT (GPM) - A LA GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL ECUADOR". Dicho proyecto de investigación evalúa el uso potencial del producto IMERG en el manejo de recursos hídricos para regiones con escasez de datos de campo. En esta tesis, se evalúan los productos IMERG v3 y TMPA v7 a escala mensual con precipitación observada en campo. Luego, se realizaron esfuerzos por corregir posibles desviaciones de los datos satelitales con los datos observados mediante una variedad de métodos espaciales; para finalmente validar los productos de precipitación mejorados.

## 1.2 ANTECEDENTES

En las últimas décadas los productos de precipitación satelital TMPA obtenidos de TRMM han mostrado resultados parcialmente positivos al ser empleados para el manejo de recursos hídricos. Por ejemplo, para zonas que carecen completamente de datos resulta bastante útil el empleo de estos productos [Huffman et al., 2007], ya que captan cualitativamente la precipitación. Cuando se emplean los valores medidos con pluviómetros no se considera la variabilidad espacial de las precipitaciones que se producen entre las mediciones, por ello la estimación de precipitación ofrece ventajas únicas sobre los pluviómetros; las más relevantes son: cobertura de grandes áreas y buena resolución espacial [Bedient et al., 2008].

Esta temática se encuentra en auge a nivel mundial, debido al reciente lanzamiento de la misión Global Precipitation Measurement (GPM) en 2014 [Hou et al., 2014]. Este estudio aumenta la posibilidad de colaboraciones a nivel internacional, acceso libre a la información de los productos IMERG y TMPA y a la publicación de los resultados de la investigación. Actualmente, estos productos se concentran en mejorar los resultados de los productos antecesores. Los productos satelitales constituyen un trabajo en conjunto dedicado a la investigación relacionada con el uso de datos de las precipitaciones por satélite en los estudios hidrológicos y desde 1998 ha producido datos muy valiosos para regiones tropicales. Al reconocer las limitaciones en cobertura espacial de los pluviómetros, los productos TMPA v7 e IMERG v3 pueden ser de gran utilidad. Como por ejemplo, Manz et al. (2017) evaluaron el producto IMERG y TMPA, al analizar 302 pluviómetros de Ecuador y Perú; donde se determina que IMERG tiene una detección superior y capacidad de estimación de la intensidad de lluvia en comparación con TMPA. La validación de TRMM 3B43 empleando datos de 14 pluviómetros en Ecuador, ubicadas en las 3 regiones más diferenciadas del país, mostró que la estacionalidad de las precipitaciones está bien representada por el producto satelital y que mediante los errores estadísticos e índices de detección, las regiones costeras y amazónicas son estimadas de manera acertada [Ballari et al., 2016].

Por ello, los productos de estimación satelital de precipitación han ido adquiriendo una mayor importancia en la investigación, que ha generado aplicaciones en la región como: en los Andes Tropicales, donde se efectuaron interpolaciones empleando la información pluviométrica procedente de una red de 723 estaciones y el producto satelital TRMM 2A25 [Manz et al., 2016], así como estudios aplicados en la cuenca del río Paute en los Andes del Ecuador, para estudiar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación [Camposano et al., 2016]. En relación a la evaluación de precipitación de datos observados con productos satelitales, IMERG v3 y TMPA v7 han sido empleados para la estimación de lluvias intensas, que resultan en un mejor modelado hidrológico [Satgé et al., 2016]. Las evaluaciones de productos TRMM a nivel diario en cuencas de la costa ecuatoriana y en la frontera peruana revela resultados con errores mínimos para capturar la estacionalidad de la precipitación [Ochoa et al., 2014, Manz et al., 2017].

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

Durante estos últimos años, la inquietud por analizar y entender el comportamiento de la precipitación ha aumentado significativamente. Sin embargo, el trabajo de cuantificar

la distribución de la lluvia presenta cierta complejidad cuando su distribución espacial y temporal es muy variable [Hou et al., 2014]. Por ejemplo este es el caso de zona Andina donde se presenta alta variabilidad espacial en la montaña en Buytaert et al. (2006). El área de influencia FONAG-EPMAPS tiene una alta densidad de estaciones meteorológicas con información pluviométrica pertenecientes a distintas instituciones. En nuestro caso existen 158 pluviómetros distribuidos en toda la zona, sin embargo existe una mala distribución de estaciones, pues hay estaciones concentradas en la zona urbana y también sitios en los cuales es necesario contar con estaciones pluviométricas. La zona es interesante pues se presentan dos regímenes de precipitación: unimodal y bimodal, además que en la parte oriental que viene hacia el Antisana existe o se produce una zona de transición como efecto de los dos anteriores.

La utilización de productos satelitales pueden mostrar la estructura espacial de la precipitación y representarla cualitativamente, si bien su estimación no es exacta esta puede ser ajustada o corregida por medio de una red meteorológica confiable [Bedient et al., 2008]. Es por ello, que es necesario la generación de una base datos con calidad controlada para el área de estudio. Además, la base permitirá validar los productos satelitales, de modo que sea posible complementar la información faltante, emplear los datos satelitales en lugares donde se carece de información o si existe la posibilidad de emplear únicamente datos satelitales para el futuro. Este tipo de trabajos brindará una herramienta para el estudio de fenómenos hidrológicos extremos y una infinidad de aplicaciones utilizando productos de precipitación por satélite. En nuestro país o regiones cercanas, el uso de estos productos ha sido poco estudiado. La ausencia de datos en una gran parte de nuestra región, dificulta el avance de aplicaciones y estudios hidrológicos.

La evaluación de los productos satelitales de precipitación permitirá determinar los alcances y aplicaciones de estos productos en el área de influencia. Debido a la liberación de información de los productos satelitales y la falta de estudios en el Ecuador, de manera específica en la zona Andina como es la zona de influencia EPMAPS-FONAG, resulta interesante y de vital importancia este tipo de investigaciones. Las instituciones como EPN, EPMAPS y FONAG trabajan en estrecha colaboración para ejecutar proyectos y programas de conservación, restauración ecológica, recuperación de servicios ecosistémicos, educación ambiental, entre otros. Este proyecto de titulación propone responder a la necesidad de estas instituciones, que permitan validar los datos de las estaciones de la red meteorológica y genere información para la toma de decisiones.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la precipitación observada en estaciones meteorológicas y recopilada de productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 en el área de influencia FONAG-EPMAPS a escala mensual.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar la zona de estudio.
- Generar una base de datos controlada de precipitación observada en campo y recopilada de los productos TMPA v7 e IMERG v3 para la zona de estudio comprendida por el área de influencia FONAG-EPMAPS.
- Realizar el análisis de sensibilidad sobre métodos de relleno de datos de las observaciones de precipitación en campo.
- Realizar un análisis espacio-temporal de la precipitación observada en las estaciones meteorológicas y productos de precipitación satelital.

### **1.5 ESTUDIOS PREVIOS**

Los estudios similares desarrollados en la temática del presente proyecto de titulación son los que se detallan en la Tabla 1.1:

**TABLA 1.1:** Estudios Similares IMERG - TMPA

Fecha	Autor	Título	Conclusiones Relevantes
agosto-2017	Mánz y otros, Imperial College London	Comparative Ground Validation of IMERG and TMPA at variable spatio-temporal scales in the Tropical Andes	IMERG tiene una detección superior y alta capacidad de estimación de la intensidad de lluvia en comparación con TMPA
abril-2016	Omar Andrade, Universidad de Cuenca	Evaluación de imágenes satelitales de precipitación GPM (Global Precipitation Measurement) a escala subdiaria para la provincia del Azuay	Los resultados de errores estadísticos e índices de detección no presentaron concordancia en resultados al emplear una escala temporal de 30 minutos.
abril-2016	Eduardo Cabrera, Universidad de Cuenca	Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay	Se determina que IMERG estima cualitativamente la precipitación para el Azuay. Presenta resultados próximos a los valores óptimos con los índices de detección para intensidades bajas, menores a 100 mm.
octubre-2016	Pablo Peña, Universidad de Cuenca	Integración de Imágenes satelitales de precipitación TRMM con información de pluviómetros para los años 2001 y 2002 en Ecuador	El uso de imágenes satelitales se complementa con los métodos de interpolación Kriging y sus derivados.
junio-2016	Ballari y otros	Validation of Satellite Precipitation (TRMM 3B43) in Ecuadorian Coastal Plains, Andean Highlands and Amazonian Rainforest	Los resultados mostraron que la estacionalidad de las precipitaciones puede ser representada con TRMM 3B43 pues estima aceptablemente la precipitación mensual en las tres regiones del Ecuador. Cuantitativamente los resultados tienen alta correlación para la región costanera y amazónica.

ELABORADO POR: Christian Díaz

## CAPÍTULO 2

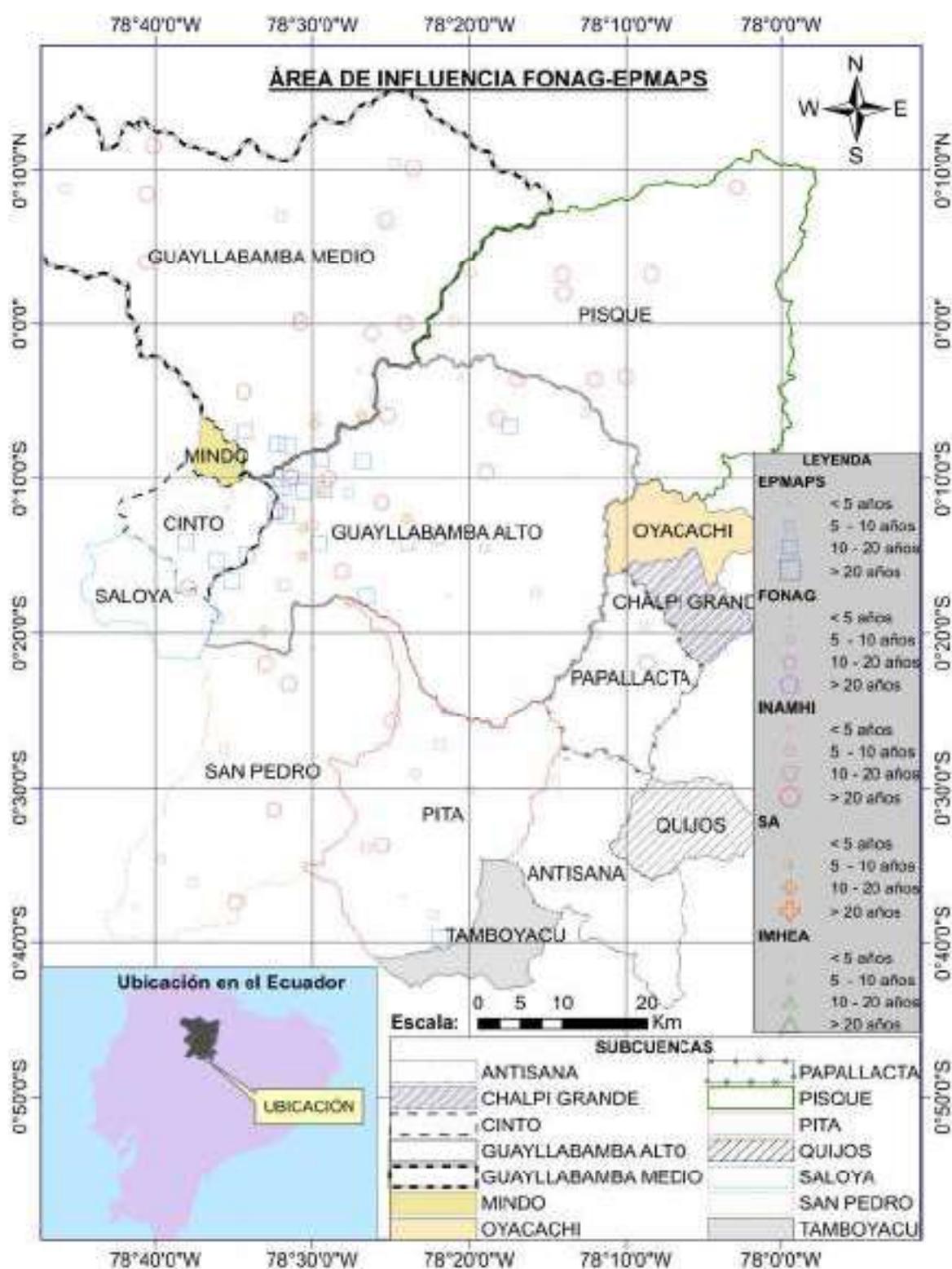
### ESTADO DEL ARTE Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 2.1 MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1 PRECIPITACIÓN

El agua es un elemento fundamental para el medio ambiente e indispensable para la vida y desarrollo de actividades económicas. El mundo enfrenta problemas relacionados con el agua, tales como sequías e inundaciones. Además de estos problemas, el calentamiento global y el cambio climático también afectan el ciclo del agua en distintas partes de la superficie terrestre. Si se pretende resolver estos problemas, es necesario determinar con precisión la distribución de la precipitación, que constituye la única fuente de agua disponible sobre el planeta. Una mejor estimación de la precipitación es fundamental para comprender el clima, mejorar su predicción y la preparación ante situaciones de cambios climáticos bruscos. Para este fin, es imperativo monitorear los cambios de precipitación en todos los rincones de la Tierra y reconocer que tenemos que compartir los recursos hídricos que van disminuyendo [Monsalve, 1995].

La precipitación como ya se mencionó constituye la variable de entrada más importante para el ciclo hidrológico, sin embargo de esto, en nuestro país ha sido poco estudiada debido a la falta de recursos [Padrón et al., 2015]. La correcta medida de esta variable es imprescindible para predecir los fenómenos extremos, así como una extensa gama de aplicaciones. Durante los últimos años, el análisis de la precipitación ha aumentado de manera notable. No obstante, el trabajo de cuantificar la distribución de la lluvia es difícil cuando su distribución espacial y temporal es altamente variable [Hou et al., 2014]. Además, las redes de monitoreo en la región son poco densas, lo que dificulta la representación espacial de la precipitación. La densidad mínima de estaciones meteorológicas recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en zonas montañosas corresponde a  $250 \text{ km}^2/\text{estación}$  [NO168, 2008]. En la Figura 2.1, se presentan las estaciones con información pluviométrica dentro de la zona de estudio, que da como resultado una densidad de  $150 \text{ km}^2/\text{estación}$ .



**FIGURA 2.1:** Estaciones meteorológicas activas dentro de la Zona de Influencia EPMAPS-FONAG, comprendida por la parte alta de la Cuenca de Esmeraldas y Napo, 2017

ELABORADO POR: Christian Díaz

Para evaluar la cobertura de estaciones meteorológicas de acuerdo a la ubicación actual de equipos pluviométricos, se considera como referencia los valores mínimos de densidad de cobertura (ver Tabla 2.1) recomendados por la Organización Meteorológica Mundial en valores de superficie de cobertura (en  $km^2$ ) por estación (OMM, 2011).

**TABLA 2.1:** Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones ( $km^2/estación$ )

Unidad fisiográfica	Precipitación	
	No. registradoras	Registradoras
Costa	900	9000
Montaña	250	2500
Planicie interior	575	5750
Montes/ondulaciones	575	5750
Islas pequeñas	25	250
Áreas urbanas	-	10 a 20
Polos/tierras áridas	10000	100000

FUENTE: OMM, 2011

De acuerdo a la Tabla 2.1 y considerando que el DMQ y zonas de sistemas de aprovechamiento hídricos de EPMAPS se encuentran en zona de montaña, la cobertura sugerida para estaciones pluviométricas registradoras es de  $2500 km^2$ , lo cual corresponde a una circunferencia de área similar con radio de cobertura de aproximadamente  $28,2 km$ . Para el caso de estaciones pluviométricas no registradoras la densidad sugerida es de  $250 km^2$ , que corresponde a una circunferencia de área similar con radio de cobertura  $8,9 km$ . En general, considerando todas las estaciones de la red pluviométrica existente se obtiene una densidad  $100 km^2/estación$ , cuyo radio de cobertura es  $5,6 km$ .

Principalmente en las regiones montañosas, como los Andes Tropicales, la topografía compleja de la zona resulta en patrones muy cambiantes de precipitación espacio-temporal. Inclusive el proceso se puede tornar más complicado por la dificultad para obtener la información, ya sea por aspectos políticos, económicos o de accesibilidad. Adicionalmente, la precipitación muestra alta variabilidad a pequeña escala por lo que requiere observaciones frecuentes y muy espaciadas para una representación adecuada. El método más importante para mejorar la calidad de la estimación espacial de las precipitaciones es aumentar la densidad de la red de monitoreo [Buytaert et al., 2006].

## 2.1.2 PRODUCTOS SATELITALES

La estimación de precipitación de los productos satelitales ofrece ventajas únicas sobre los pluviómetros por poseer su cobertura casi global, además que pueden mostrar la precipitación en zonas donde se carece de información y en tiempo casi real. Sin embargo, muchos de estos satélites sólo analizan una región dos veces por día. Por eso muchos productos satelitales combinan información proveniente de distintos satélites. Es por ello, que el estudio se limita a emplear los productos TMPA v7 e IMERG v3, que se definen a continuación.

## 2.1.3 TRMM

TRMM, por sus siglas en inglés (Tropical Rainfall Measuring Mission) o conocida en español como Misión de Medición de Lluvias Tropicales, es un trabajo conjunto de la American

National Aeronautics and Space Agency (NASA) y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) dedicada a la investigación relacionada con la generación de los productos de precipitaciones. La misión fue lanzada en noviembre de 1997 y ha proporcionado datos desde inicios de 1998. Durante este tiempo ha recopilado más de 17 años de datos muy valiosos en regiones tropicales. Esta misión llegó oficialmente a su fin el 15 de abril de 2015. Como su nombre lo indica, solo cubre la zona tropical, entre las latitudes  $50^{\circ}$  N y  $50^{\circ}$  S.

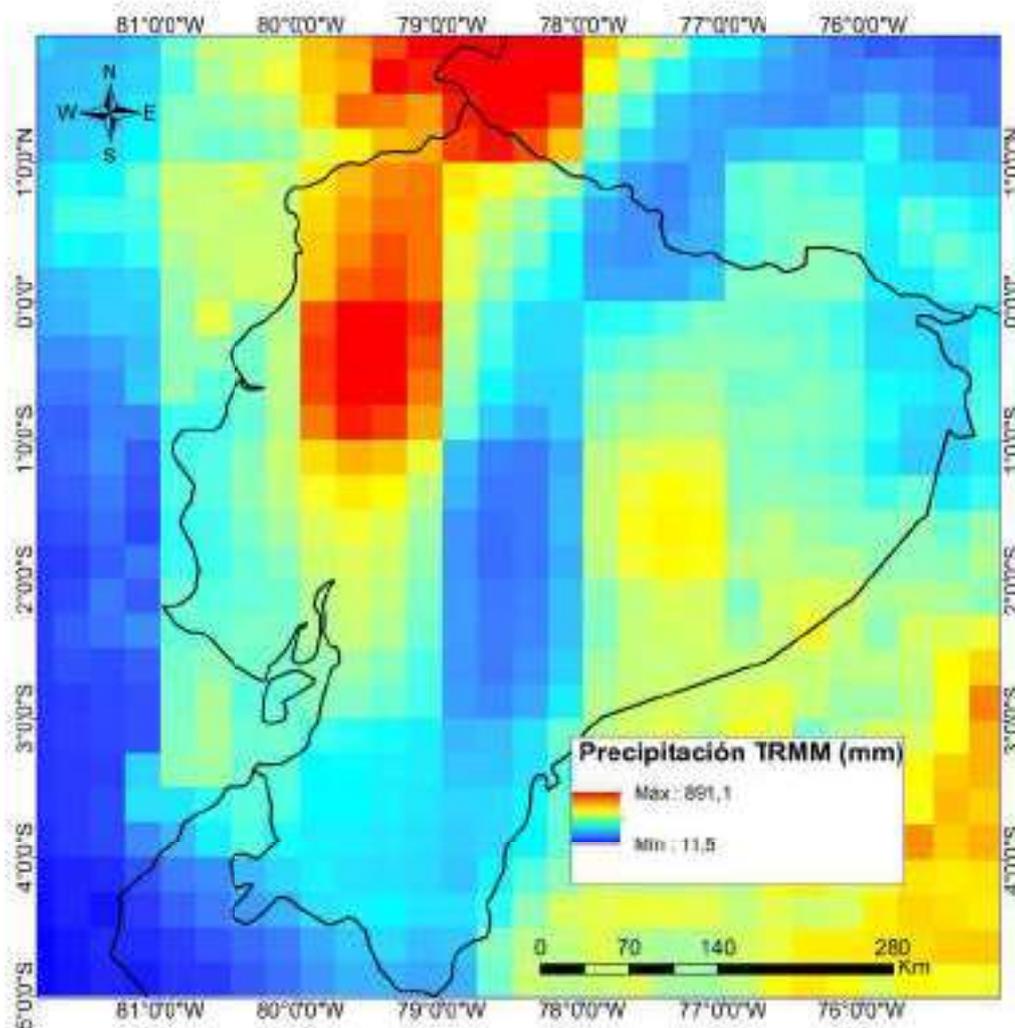
### 2.1.3.1 TMPA

El propósito del algoritmo TMPA 3B43 v7 es el de producir la estimación mejorada de la tasa de precipitación (mm/h) y constituye el producto satelital seleccionado para el presente estudio técnico. Al combinar mediciones de precipitación del Global Precipitation Climatology Center (GPCC) con datos integrados de estimaciones de datos de alta calidad de 3 horas (TMPA 3B42 v7) se crea una combinación a nivel mensual en tiempo post real que deriva en la mejor estimación única de precipitación media mensual obtenida [Huffman et al., 2007].

El TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis, que por conveniencia se le conoce por sus siglas como TMPA, está diseñado para combinar las mediciones en Tierra, cuando es posible, con estimaciones de precipitación de varios sistemas satelitales, tales como: el radar de precipitación TRMM (PR), microondas pasivo (PMW) e infrarrojo (IR) desde múltiples satélites de baja órbita terrestre y geostacionarios. El producto TMPA como se mencionó combina estimaciones de precipitaciones de varios satélites, además de un análisis de calibración cuando existe la posibilidad. Gracias a las calibraciones de la combinación de los productos de precipitación de Microondas Imager TRMM y productos de instrumentos TRMM, la información se encuentra disponible en tiempo real y posterior. La resolución espacial de TMPA es de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  y la resolución temporal es de 3 horas. A pesar que la misión culminó en el año 2015, el producto TMPA sigue produciéndose por medio de los sensores microondas de demás satélites vigentes hasta nuestros días.

De los estudios sobre el uso de productos TMPA se distinguen dos líneas de investigación: la primera propone evaluar los datos de TMPA con las observaciones de campo, para estudiar la variación temporal y espacial o comprobar la validez de los productos. En la segunda, se investiga el uso potencial de satélites como una fuente independiente de información o para completar series de observaciones en campo, que sería de gran utilidad debido a la escasez de datos.

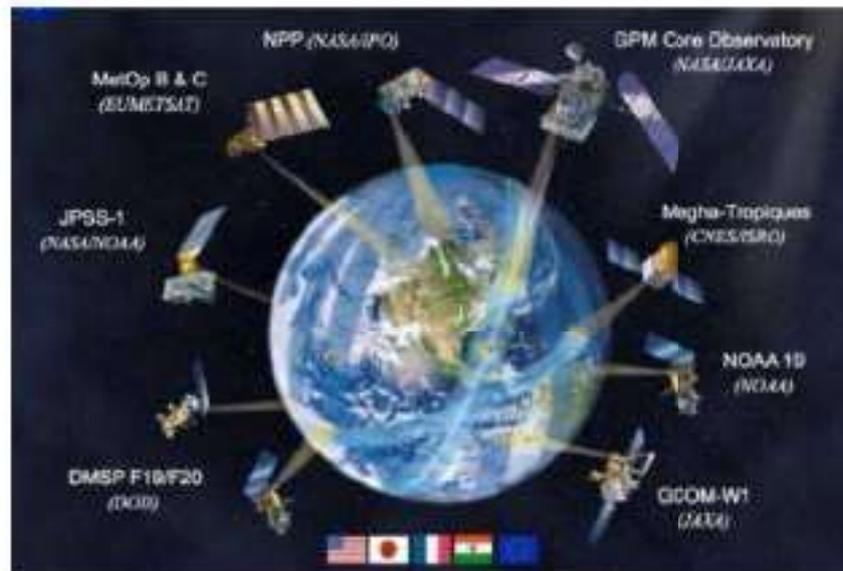
A continuación, en la Figura 2.2 se ilustra las estimaciones de precipitación mensual para enero del 2016 para todo el Ecuador determinada por medio del producto satelital TMPA.



**FIGURA 2.2:** Imagen satelital TMPA de precipitación del mes de Enero de 2016 para el Ecuador  
Fuente: Mirador (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>)

#### 2.1.4 GPM

Con propósitos similares de TRMM aparece GPM que es una misión mundial compuesta por una red de satélites que provee una generación nueva de productos de medición de lluvia y nieve. GPM inició sus trabajos el 27 de Febrero de 2014 por la NASA y la JAXA. Actualmente, se sitúa a 407 km de altitud y las observaciones cubren una latitud de  $60^{\circ}$  N al  $60^{\circ}$  S, pero en un futuro se planea expandir las observaciones a mayores latitudes, que cubre el globo desde el Círculo Ártico al Antártico [Huffman et al., 2015]. La constelación de GPM posee aproximadamente 10 satélites y se espera que continúe la estrategia de muestreo del TRMM (Figura 2.3).



**FIGURA 2.3:** Constelación de satélites GPM

Fuente: [http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data\\_utilization/GPM\\_data\\_util\\_handbook\\_E.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/GPM_data_util_handbook_E.pdf)

GPM posee distintos productos para diferentes niveles, el presente estudio se centra en el algoritmo IMERG V3 que intercalibra, fusiona e interpola las estimaciones de todos los sensores implicados. La manera de acceder a los datos GPM y manuales de usuario es por medio del portal web (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/gpm>), Mirador (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>) es otro servidor de búsqueda y acceso a datos a través de diferentes servicios web como: OPeNDAP, GDS, WMS, WCS y conversión en diferentes formatos (NetCDF, HDF, KML (para Google Earth), ASCII). GIOVANNI-4 (Geospatial Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure) es una interfaz en línea que también permite la exploración, visualización, descarga y análisis estadístico de los diferentes niveles de los productos GPM. Para ello se puede acceder al portal (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>).

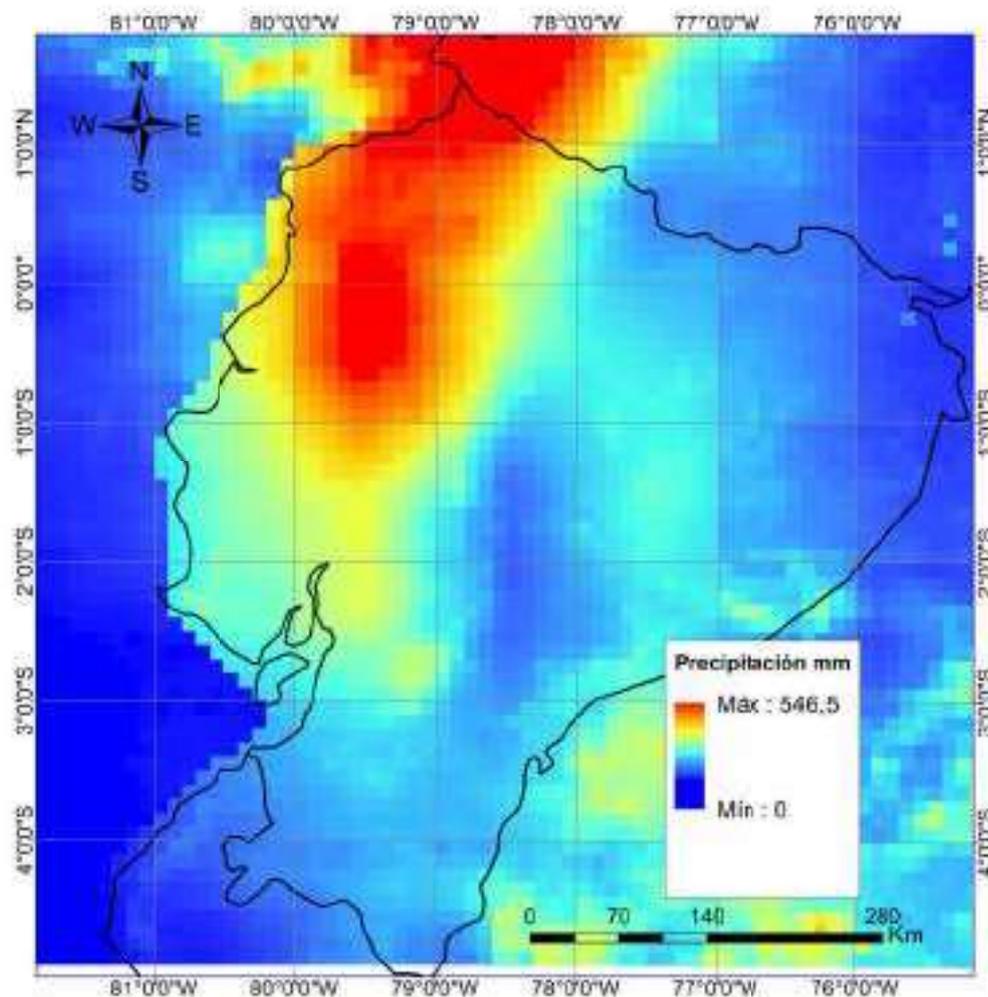
GPM esta siendo utilizado para múltiples aplicaciones relacionada con eventos extremos y desastres (inundaciones, ciclones, deslizamientos) [Prakash et al., 2016], estudio de recursos hídricos y agricultura (gestión de los recursos hídricos, sequías) [Ballari et al., 2016], aplicaciones de Climatología y Modelación (Modelación global del clima, predicción numérica en tiempo real) [Huffman et al., 2007] y Salud y ecología (seguimiento de enfermedades, migración animal y seguridad alimentaria) [Yong et al., 2015].

#### 2.1.4.1 IMERG

IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM), que quiere decir "Recuperaciones multi-satelitales integradas para el GPM", es un algoritmo que intercalibra, combina e interpola las estimaciones de precipitación de los sensores: GPM Microwave Imager y un radar de precipitación de doble frecuencia (DPR), cuya resolución espacial es de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  y resolución temporal de 30 minutos. Este producto ha estado a disposición de los usuarios a partir de Enero de 2015 con datos a partir de Marzo de 2014. El algoritmo IMERG v3 intercalibra, fusiona e interpola todas las estimaciones de precipitación de microondas en conjunto con estimaciones de satélites infrarrojos (IR) calibrados por microondas, análisis de medidores de precipitación, y potencialmente otros medidores de precipitación a escalas fi-

nas de tiempo y espacio. El sistema se ejecuta varias veces para cada tiempo de observación dando primero una estimación rápida y proporcionando sucesivamente mejores estimaciones a medida que llegan más datos. El paso final usa datos de pluviómetros mensuales para crear productos a nivel de investigación [Huffman et al., 2015].

En la Figura 2.4 se ilustra como ejemplo la imagen satelital IMERG para el Ecuador durante el mes de enero de 2016. También se puede apreciar una mayor resolución espacial con IMERG para el área de estudio.



**FIGURA 2.4:** Imagen satelital IMERG de precipitación del mes de Enero de 2016 para el Ecuador  
Fuente: GIOVANNI-4 (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>)

A continuación, se presenta en la Tabla 2.2 una comparación entre el producto TMPA V7 en referencia al producto IMERG V3.

TABLA 2.2: Cuadro Comparativo TMPA e IMERG

Algoritmo	TRMM Análisis de Precipitación Multisatélite	Recuperaciones multi-satelitales integradas para el GPM
Acrónimo	TMPA v7	IMERG v3
Conjunto de datos	Con satélites aportantes de información, validada con información obtenida sobre la superficie	GMI/DPR con los satélites de la constelación del GPM para rendir mejores estimaciones espaciales/temporales de precipitación
Intervalo de tiempo, lapso	3 horas , mensual (Enero 1998 - presente)	30 minutos , mensual (Abril 2014 - presente)
Resolución espacial	0.25° x 0.25° lat/lon	0.1° x 0.1° lat/lon
Cobertura espacial	50° S a 50° N	60° S a 60° N

Fuente: NASA

ELABORADO POR: Christian Díaz

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años se han iniciado estudios comparativos de IMERG con respecto a TMPA. Uno de ellos es el realizado por Tang et al. (2015), en el sureste de China, específicamente en la cuenca del río Ganjiang, que tiene una topografía muy compleja; donde se han obtenidos correlaciones aceptables del producto IMERG y los datos medidos por redes de monitoreo. En la India, Prakash et al.(2016) evaluaron el producto IMERG v3 y TMPA-3B42 v7 para la detección y estimación de la precipitación. Los resultados de este estudio pronostican un excelente modelado de fenómenos hidrológicos extremos empleando productos satelitales de precipitación. En Grecia, Feidas (2010) evaluó los productos TRMM 3B42 (0.5 ° y 1 °), TRMM 3B43 (0.5 °, 1 ° y 2.5 °); el TRMM Microondas Imager (TMI) (0.5 °) y demás productos de precipitación a nivel mensual, anual y estacional. Se determinó que TRMM 3B43 mostró un excelente desempeño en todas las resoluciones espaciales dentro del área de estudio a las que fue evaluada mientras que el TRMM 3B42 muestra resultados razonables.

El estudio de TRMM en nuestro país y zonas cercanas o similares, existen trabajos de investigación como el de Zulkafli et al. (2014), donde analizan la versión v7 en cuencas andinas y amazónicas. Se encontró que el sesgo es menor en comparación con la versión v6 y la representación de la distribución de precipitación presenta una importante mejoría. En Scheel et al. (2011) se evalúa el producto TRMM 3B42 v6 en las zonas andinas de Perú a nivel diario estimando un elevado sesgo. La detección de eventos de precipitación es atinada, no obstante se subestiman las intensidades. En nuestro país o regiones cercanas, el uso de estos productos ha sido poco estudiado. La ausencia de datos en mayor parte del territorio ecuatoriano, dificulta el desarrollo de aplicaciones. En relación a la evaluación de precipitación de datos observados con productos satelitales IMERG v3 y TMPA v7 han sido empleados para la estimación de lluvias intensas, que resultan en un mejor modelado hidrológico, pues se obtienen valores más cercanos a los datos medidos [Derin et al., 2016, Guo et al., 2016]. Evaluaciones de productos TRMM a nivel diario en cuencas de la costa ecuatoriana y la frontera peruana revelan buenos resultados para capturar la estacionalidad de la precipitación [Ochoa et al., 2014]. Así mismo, un estudio del producto TRMM 3B43 realizado por Castro et al. (2015) a nivel mensual para el Litoral, Sierra y Amazonía de nuestro país indica que la precipitación a nivel mensual está bien representada cualitativamente. Los errores estadísticos, así como los índices de detección están mejor representados en forma cuantita-

tiva en la región litoral y amazónica que en la Sierra. Erazo et al. (2018) evaluaron TMPA 3B43 v7 y datos de precipitación sobre la vertiente del Pacífico y la costa del Ecuador, donde indica que los datos TRMM están más cerca de las observaciones, principalmente sobre las tierras bajas pero presenta limitaciones para reproducir la variabilidad en los Andes.

Por lo reciente del producto IMERG en 2015 y la falta de estudios en zonas andinas como el área que comprende el presente estudio, es de mucha importancia una evaluación de IMERG para futuras investigaciones y aplicaciones. Además que, mejora la eficiencia de la investigación, facilita el acceso y permite compartir conocimientos. Por ello, se realiza el presente estudio con una mayor densidad de estaciones, en un área montañosa, donde se explora comparativamente IMERG v3 y TMPA v7 a nivel mensual; además que ayuda a mejorar el entendimiento de la precipitación mediante productos satelitales.

### **2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La información cartográfica empleada para caracterizar la zona de estudio se adquirió de distintas instituciones nacionales e internacionales. La mayoría de la información utilizada se encuentra disponible en el Sistema Nacional de Información (SNI). Las características de la información empleada para realizar la caracterización y representación de mapas se encuentran en la Tabla 2.3:

**TABLA 2.3:** Información cartográfica utilizada en el proyecto para caracterizar la zona

Información Cartográfica	Formato	Año	Escala	Descripción	Institución Responsable
División política del Ecuador	Vector	2012	1:50000	División del Ecuador por provincias	INEC
DEM	Raster	2014	-	Modelo Digital de Elevación	USGS - NASA
Ríos Dobles	Vector	2012	1:250000	Capas de información geográfica base	IGM
Red vial estatal	Vector	2015	1:25000	Estado actual de la red vial estatal	MTOP
Red estaciones meteorológicas INAMHI	Vector	2013	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	INAMHI
Red estaciones meteorológicas EPMAPS	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	EPMAPS
Red estaciones meteorológicas FONAG	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	FONAG
Red estaciones meteorológicas IMHEA	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	IMHEA
Red estaciones meteorológicas SA	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	Secretaría del Ambiente
Cobertura y uso del suelo	Vector	2013-2014	1:100000	Caracterización de cobertura y uso del suelo	MAE-MAGAP
Áreas protegidas	Vector	2015	1:250000	Áreas protegidas del país	MAE
Bosques protectores	Vector	2015	1:50000	Áreas pertenecientes al Sistema Nacional de bosques y vegetación protectora	MAE
Textura del suelo	Vector	2002	1:50000	Descripción de texturas del suelo	MAGAP-SIGAGRO
Taxonomía del suelo	Vector	2002	1:50000	Clasificación de suelos y descripción del material	MAGAP-PRONAREG
Geología	Vector	2008	1:100000	Cartas geológicas del Ecuador	MAGAP-SIGAGRO
Captaciones, cuerpos de Agua, Conducciones	Vector	2010	1:50000	Capas de información geográfica base	EPMAPS

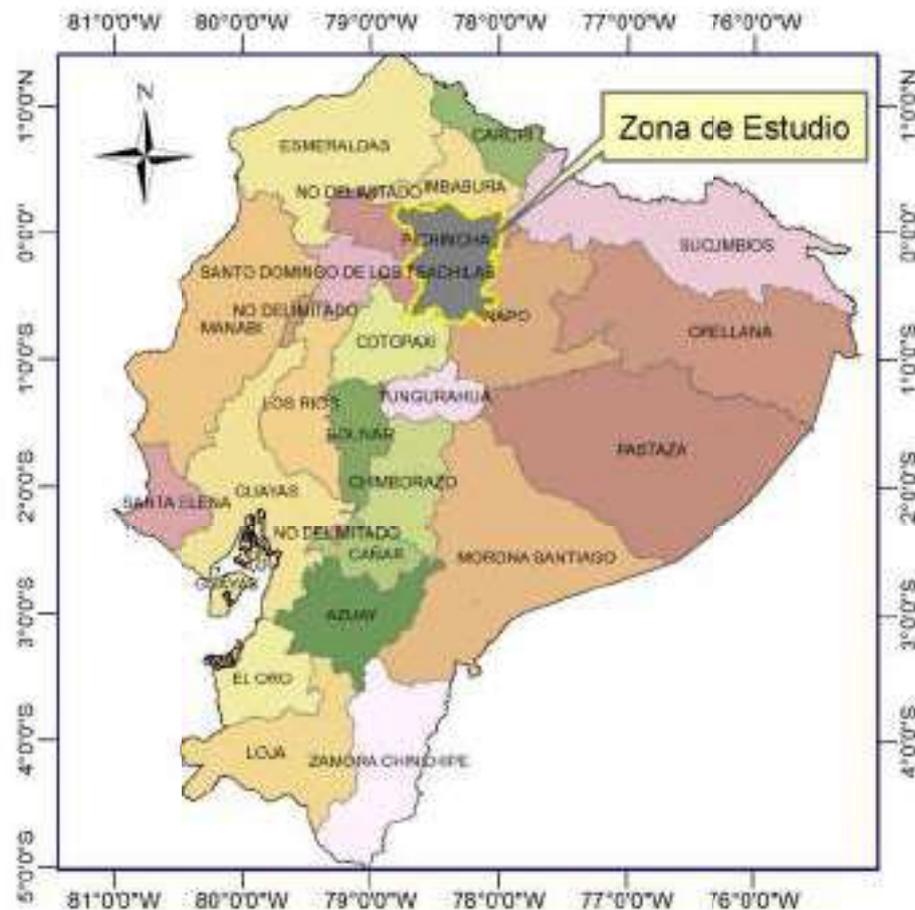
ELABORADO POR: Christian Díaz

### 2.3.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA

Se presentan ciertas características de la zona de estudio tales como: precipitación, uso del suelo, cobertura vegetal, textura, taxonomía, población; así como la pendiente, elevación, red hidrográfica y cuencas (pfastetter). Estos son factores que deben ser considerados como los responsables de la ubicación y de la densidad de la red de estaciones pluviométricas [Pourrut et al., 1995] ,pues estos facilitan o dificultan la instalación de pluviómetros. Además de considerar los parámetros anteriores es necesario analizar la incertidumbre que se presenta debido a la pendiente y presencia de obstáculos.

### 2.3.1.1 Ubicación y Área de estudio

La zona de estudio comprende gran parte de la provincia del Pichincha y una pequeña de la provincia de Napo (78° 30' W y 0° 10' S aproximadamente), ubicada al norte del Ecuador, en la parte del septentrional de la cordillera de los Andes a una altura media de 3000 *msnm*. La temperatura promedio oscila entre 10° - 25° C debido a la altura. La zona de influencia FONAG-EPMAPS limita al norte con la Provincia de Imbabura, al sur con las provincias de Cotopaxi; mientras que al este se encuentra limitada con la provincia de Napo, y al occidente con la provincia de Santo Domingo (Figura 2.5).

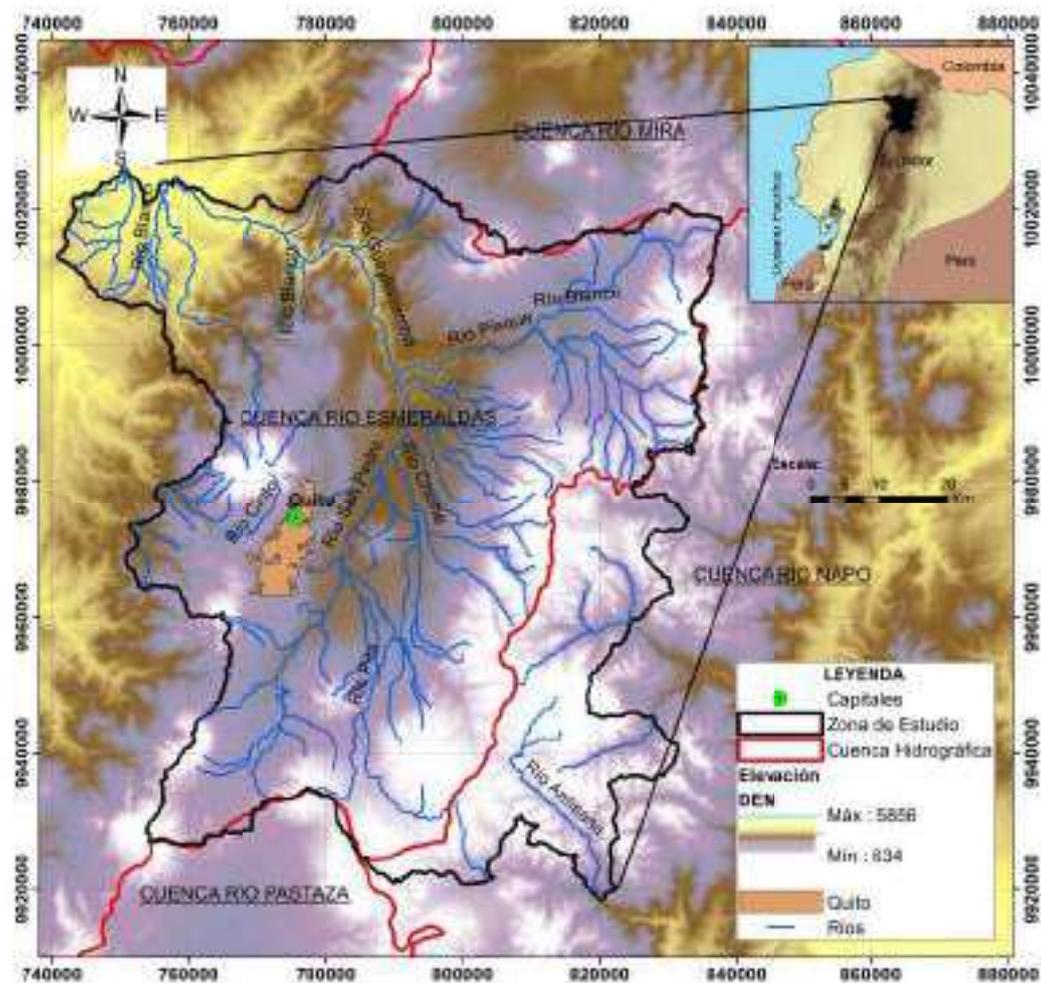


**FIGURA 2.5:** Ubicación de la Zona de Estudio  
ELABORADO POR: Christian Díaz

La zona de estudio llamada Área de Influencia FONAG-EPMAPS está conformada por la parte alta de las cuencas de Esmeraldas y Napo (Figura 2.6). Parte de la cuenca alta del río Napo, se sitúa al nororiente del Ecuador en la vertiente Atlántica de la cordillera de los Andes. Esta se encuentra localizada en la transición de la Sierra hacia la Amazonia y la otra parte por la parte alta de la cuenca del río Esmeraldas, situada al noroccidente del Ecuador en la vertiente del Pacífico, en la transición de la Sierra hacia el Litoral.

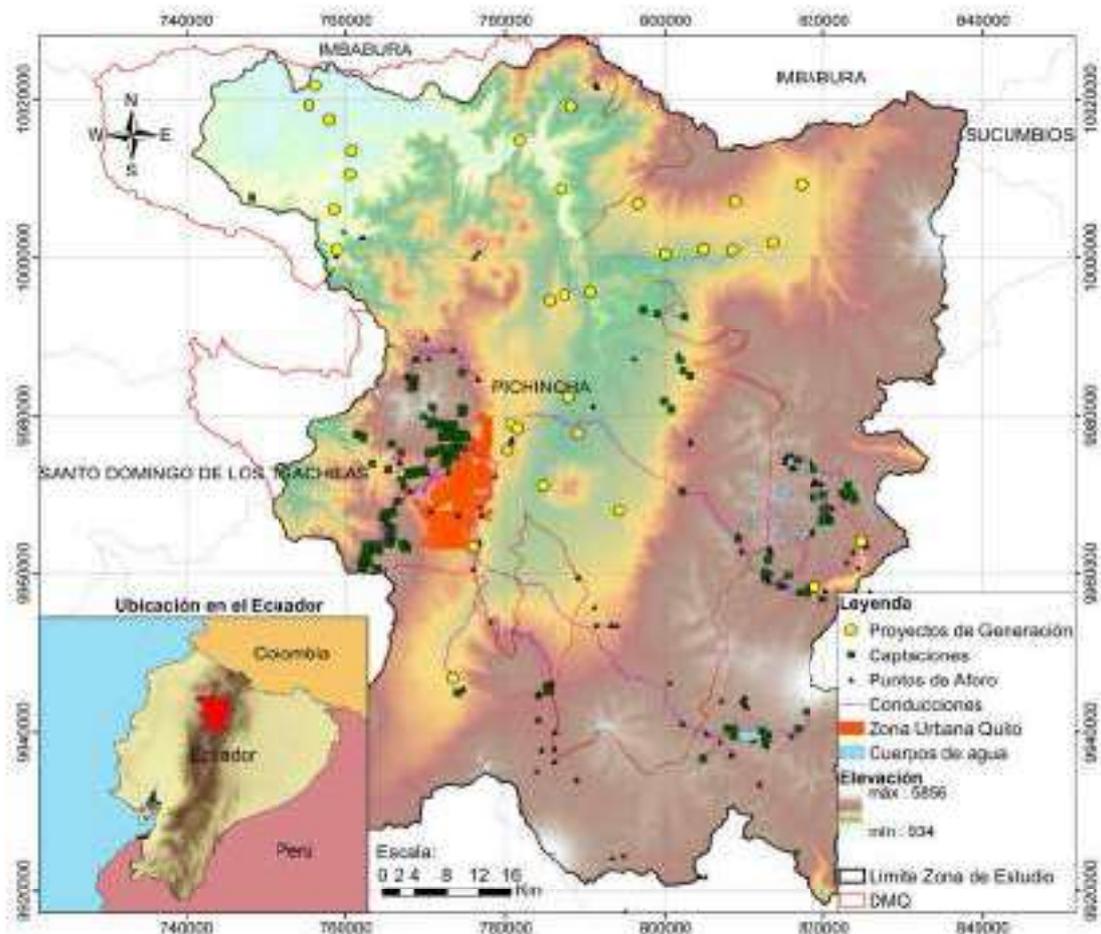
El área de estudio comprende 6846.6  $km^2$ . El terreno es irregular y tiene una elevación que varía entre los 700 y 1200 *msnm* en partes bajas, con un promedio de 2800 *msnm* en los valles y elevaciones que van desde 3000 *msnm* a 5800 *msnm* en los sitios más altos. Algunas estribaciones desprendidas de la cordillera de los Andes han formado un paisaje

enclaustrado pues existen dos zonas diferenciadas: el este, un área dominada por los Andes orientales y occidentales. Así como también, la principal cadena montañosa perteneciente al volcán Pichincha, el que se encuentra emplazado en la Cordillera de los Andes, encierra a la urbe, principalmente el DMQ (Distrito Metropolitano de Quito), hacia el oeste con sus tres diferentes elevaciones, Guagua Pichincha (4794 *m.snm*), Rucu Pichincha (4698 *m.snm*) y Cóndor Guachana. Al oeste, un área que corresponde a la región Costa, que se halla poblada por ramificaciones subandinas. Los ríos más importantes son el Guayllabamba, el Blanco, el Pita, el Pisque y el San Pedro, todos de la cuenca del Pacífico (Figura 2.6).



**FIGURA 2.6:** Zonas Diferenciadas del Área de Estudio  
ELABORADO POR: Christian Díaz

El área de estudio involucra 13 subcuencas en donde FONAG y EPMAPS mantienen sus actividades de aprovechamiento hídrico y descarga de agua empleada. En esta zona operan sistemas de agua potable de EPMAPS como son: Abducción Pichincha, Atacazo, La Mica, Lloa, Noroccidente, Papallacta, Pita, Puengasí, Quito Sur, Rumipamba y todos los sistemas menores, como se ve en la Figura 2.7 .



**FIGURA 2.7:** Lugares de captación de agua, puntos de aforo, proyectos de generación hidroeléctricos y principales sistemas de Agua Potable EPMAPS

ELABORADO POR: Christian Díaz

Además existen predios pertenecientes a EPMAPS y FONAG en los cuales se efectúan acciones de conservación y recuperación de cobertura vegetal. El mapa general de la zona de estudio se encuentra en el Anexo 1 MAP01, donde se manifiesta la ubicación del área de estudio, los ríos, las vías principales y la ubicación de las estaciones pluviométricas empleadas en el trabajo de investigación.

### 2.3.1.2 Político-Administrativo

El mayor porcentaje de la zona de estudio está dentro del cantón Quito, seguido por Cayambe, Mejía, Quijos, Archidona, Pedro Moncayo y en menores porcentajes en los cantones Rumiñahui, San Miguel de los Bancos, El Chaco y Latacunga.

**TABLA 2.4:** Área de la zona de estudio correspondiente a cada cantón

Cantón	Área	
	(km <sup>2</sup> )	(%)
LATACUNGA	39.4	0.6
OTAVALO	21.5	0.3
ARCHIDONA	457.1	6.7
EL CHACO	140.3	2.1
QUIJOS	492.8	7.2
CAYAMBE	923.1	13.5
MEJIA	754.1	11.0
PEDRO MONCAYO	336.3	4.9
RUMINAHUI	135.6	2.0
SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	6.5	0.1
QUITÓ	3540.0	51.7

FUENTE: INEC, 2002

La relación de las áreas de cada cantón con relación al total del área de estudio se muestra en la Tabla 2.4. El mapa de distribución cantonal se encuentra en el Anexo 1 MAP02, donde se puede observar la distribución política por cantones.

### 2.3.1.3 Áreas Protegidas

#### Áreas Naturales Protegidas

El Patrimonio Nacional de Áreas Naturales se define como el conjunto de áreas silvestres que destaquen por su valor protector, científico, escénico, educacional, turístico y recreacional, por su flora y fauna o porque constituyen ecosistemas que contribuyen a mantener el equilibrio del medio ambiente. Para efectos de su administración se clasifican en: parque nacional, reserva ecológica, refugio de vida silvestre, reserva biológica, áreas nacionales de recreación, reserva de producción de fauna y área de caza y pesca. En la Tabla 2.5 se presenta las áreas naturales protegidas, su área y porcentaje respecto a la zona de estudio.

**TABLA 2.5:** Área de la zona de estudio correspondiente a las áreas naturales protegidas

Área natural protegida	Área	
	(km <sup>2</sup> )	(%)
Parque Nacional Cotopaxi	180.2	2.6
Reserva Ecológica Antisana	377.7	5.5
Parque Nacional Cayambe Coca	603.8	8.8
Reserva Ecológica Los Illinizas	74.6	1.1
Reserva Geobotánica Pufulahua	34.4	0.5
Refugio de Vida Silvestre Pasochoa	6.2	0.1

FUENTE: MAE, 2015

#### Bosques y vegetación protectores

En el artículo 6 de la Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre, respecto a los recursos forestales, se consideran bosques y vegetación protectores aquellas formaciones vegetales, naturales o cultivadas, que cumplan con uno o más de los siguientes requisitos: a) tener como función principal la conservación del suelo y la vida silvestre, b) estar situados en áreas que permitan controlar fenómenos pluviales torrenciales o la

preservación de cuencas hidrográficas (especialmente en las zonas de escasa precipitación pluvial), c) ocupar cejas de montaña o áreas contiguas a las fuentes de agua, d) constituir cortinas rompevientos o de protección del equilibrio del medio ambiente, e) hallarse en áreas de investigación hidrológico- forestal, f) estar localizados en zonas estratégicas para la defensa nacional, y g) constituir factor de defensa de los recursos naturales y de obras de infraestructura de interés público. En la Tabla 2.6 se presentan los bosques protectores, su área y porcentaje que ocupan dentro de la zona de estudio.

**TABLA 2.6:** Área de la zona de estudio correspondiente a los bosques protectores

Bosque protector	Área	
	(km <sup>2</sup> )	(%)
MAQUIPUCUNA	24.7	0.4
MOJANDA GRANDE	8.2	0.1
HACIENDA PIGANTA	10.1	0.2
UMBRIA	9.7	0.1
JERUSALEN	11.6	0.2
CAMBUGAN	41.1	0.6
LA PAZ Y SAN JOSE DE QUIJOS	4.0	0.1
SAN CARLOS DE YANAHURCO	6.5	0.1
PASO ALTO	14.9	0.2
MINDO NAMBILLO	33.1	0.5
CUENCA RIO GUAYLLABAMBA (AREA 1 - AREA 2)	155.9	2.3
SANTA ROSA Y YASQUEL	25.3	0.4
TOAZA	12.5	0.2
SUBCUENCAS ALTAS DE LOS RIOS ANTISANA, TAMBO, TAMBOYACU Y PITA	441.5	6.5
TANLAHUA Y AMPLIACION	18.6	0.3
FLANCO ORIENTAL DE PICHINCHA Y CINTURON VERDE DE QUITO	363.4	5.3
SUBCUENCA ALTA DEL RIO CINTO, SALOYA Y QDA SAN JUAN	89.2	1.3

FUENTE: MAE, 2015

Cerca del 37% de la zona de estudio forma parte de áreas destinadas a la protección y conservación. El mapa de áreas protegidas y bosques protectores se encuentra en el Anexo 1 MAP03.

#### 2.3.1.4 Textura del Suelo

La fase sólida del suelo está compuesta en su mayoría de partículas de naturaleza mineral, las que de acuerdo a su diámetro se clasifican como: grava gruesa, media y fina, arena, limo y arcilla [Monsalve, 1995]. La textura del suelo es la proporción relativa a las fracciones de arena, limo y arcilla que constituyen la masa del suelo y está íntimamente relacionada con la composición mineral, el área superficial específica y el espacio de poros del suelo. El conocimiento de las proporciones de las partículas de diferentes tamaños en el suelo es crítico para entender el comportamiento del suelo: tiene influencia sobre el movimiento y la disponibilidad de agua del suelo, la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a la penetración por las raíces [Laraque et al., 2009]. A medida que el tamaño de las partículas disminuye aumenta el área superficial específica, y así aumenta la capacidad del suelo para: retención de agua y nutrientes, mantener a las partículas cohesionadas [Brady et al., 2002]. Adicionalmente, la textura afecta a la escorrentía y la infiltración: en suelos con una textura fina presentan menor infiltración y mayor escorrentía. En contraste, en suelos de textura media o moderadamente gruesa la mayoría de la precipitación se infiltra y muy poca escurre.

**TABLA 2.7:** Área de la zona de estudio correspondiente a la textura del suelo

Textura	Área	
	(km <sup>2</sup> )	(%)
FINA	130.3	1.9
GRUESA	955.1	14.0
MEDIA	916.7	13.4
MODERADAMENTE GRUESA	2607.8	38.1
NIEVE	42.6	0.6
NO APLICABLE	2024.5	29.6
ROCA	68.8	1.00
URBANO	101.8	1.5

FUENTE: MAGAP- SIGAGRO, 2002

En la Tabla 2.7 se tiene que gran parte del suelo perteneciente a la zona de estudio tiene una textura moderadamente gruesa (38.1%) y no aplicable (29.6%), que corresponden a sitio sin información o en su defecto que constituyen cuerpos de agua. Solo en las partes altas de la zona se presentan nieve o inclusive roca. Cuando se produce un evento de precipitación existe más infiltración que escorrentía en mayor parte del área de estudio, y solo en la zona baja donde la textura es media, fina o urbana la escorrentía es mayor [Almeida, 2010]. El mapa de textura del suelo se encuentra en el Anexo 1 MAP04.

### 2.3.1.5 Taxonomía

Los suelos de todo el mundo se asignan a uno de los 12 órdenes del suelo, en gran medida sobre la base de las propiedades del suelo que reflejan un importante desarrollo, con énfasis en la presencia o ausencia de grandes horizontes de diagnóstico [Brady et al., 2002]. Según la Tabla 2.8 el mayor porcentaje de orden de suelo corresponde a Inceptisoles con 48.5%.

**TABLA 2.8:** Área de la zona de estudio correspondiente a la taxonomía del suelo

Taxonomía	Área	
	(km <sup>2</sup> )	(%)
CUERPOS DE AGUA	3.2	0.1
ENTISOLES	184.7	2.7
ENTISOLES - INCEPTISOLES	12.7	0.2
ENTISOLES - MOLLISOLES	3.0	0.1
INCEPTISOLES	3322.9	48.5
INCEPTISOLES - MOLLISOLES	8.5	0.1
MOLLISOLES	810.6	11.8
MOLLISOLES - INCEPTISOLES	18.1	0.3
NIEVE	42.6	0.6
NO APLICABLE	264.1	3.9
ROCA	68.8	1.0
SIN INFORMACION	159.6	2.3
SIN SUELO	1844.9	26.9
URBANO	101.8	1.5

FUENTE: MAGAP-PRONAREG, 2002

Dos tipos de suelos destacan en la región: en las partes altas y medias se encuentran los Inceptisoles, que se hallan en áreas con significativa profundidad de ceniza volcánica, tienen una capacidad de retención de agua muy alta que amortigua la escorrentía produciendo un

patrón de caudales de las cuencas bastante uniforme por lo que sirven como proveedores de agua para las depresiones andinas densamente pobladas [Buytaert et al., 2003], mientras que en las partes bajas predominan los Mollisoles, que se forman en las zonas semihúmedas, típicamente bajo una cobertura de pasturas. El mapa de taxonomía del suelo se halla en el Anexo 1 MAP05.

### 2.3.1.6 Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal desempeña un papel significativo en la protección de las pendientes. Esta característica es relevante en el establecimiento de los términos del balance hídrico, fundamentalmente la evapotranspiración y el escurrimiento superficial. Además, es un factor a considerar por su influencia en las variables hidrológicas como: tiempo de concentración, infiltración, etc [Pourrut et al., 1995, Mendoza et al., 2002].

Según la Tabla 2.9, el páramo ocupa la mayor cantidad de la zona (32.2%), y el pastizal ocupa el segundo (11.8%). El resto de coberturas ocupan menos del 11% del total de la zona de estudio.

**TABLA 2.9:** Área de zona de estudio correspondiente a la cobertura vegetal

Uso del suelo	Área	
	(km <sup>2</sup> )	(%)
AREA POBLADA	470.3	6.9
AREA SIN COBERTURA VEGETAL	97.6	1.4
BOSQUE NATIVO	755.2	11.0
CULTIVO ANUAL	214.7	3.1
CULTIVO PERMANENTE	33.9	0.5
CULTIVO SEMI-PERMANENTE	15.1	0.2
GLACIAR	28.3	0.4
INFRAESTRUCTURA	37.4	0.5
MOSAICO AGROPECUARIO	472.1	6.9
NATURAL	21.4	0.3
OTRAS TIERRAS AGRICOLAS	0.9	0.1
PARAMO	2205.8	32.2
PASTIZAL	1449.9	21.2
PLANTACION FORESTAL	146.1	2.1
VEGETACION ARBUSTIVA	810.5	11.8
VEGETACION HERBACEA	88.2	1.3

FUENTE: MAE- MAGAP, 2013- 2014

La existencia de vegetación reduce la escorrentía y promueve la infiltración. El páramo se ubica en la parte alta de la zona; y por lo tanto almacena el agua en esa zona, producto de la precipitación. La presencia de bosque nativo en la mayoría incrementa la capacidad de infiltración, y el follaje intercepta un porcentaje de la precipitación [Pourrut et al., 1995]. El mapa de cobertura vegetal se encuentra en el Anexo 1 MAP06.

### 2.3.1.7 Uso del suelo

El conocimiento del uso del suelo es de gran importancia para conocer cómo responde la cuenca ante una precipitación. Por ejemplo, mientras más urbanizada esté una zona se generan mayores tasas de escorrentía para un mismo evento de lluvia, ya que las zonas urbanas están caracterizadas por mayores porcentaje de impermeabilidad [Bedient et al., 2002].

**TABLA 2.10:** Área de la zona de estudio correspondiente a los usos del suelo

Uso del suelo	Área	
	( <i>km</i> <sup>2</sup> )	(%)
BOSQUE	901.4	13.2
CUERPO DE AGUA	21.4	0.3
OTRAS AREAS	126.0	1.8
TIERRA AGROPECUARIA	2186.6	31.9
VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA	3104.1	45.3
ZONA ANTROPICA	508.1	7.4

FUENTE: MAE- MAGAP, 2013- 2014

En la Tabla 2.10 se presentan las áreas y porcentajes del uso del suelo dentro de la zona de estudio. El mapa de uso del suelo en la zona de estudio se encuentra en el Anexo 1 MAP07. Los principales usos del suelo de la zona son de tierra agropecuaria y de vegetación arbustiva y herbácea debido a que la mayoría de la zona está dentro de áreas protegidas. La superficie restante se utiliza como bosque, cuerpos de agua, zona antrópica y otras áreas.

### 2.3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA

Las características físicas están en función de la morfología: forma, relieve, red de drenaje, la textura, taxonomía y uso del suelo, la cobertura vegetal, etc. Gracias a estos elementos es posible conocer la variedad espacial de los elementos del régimen pluviométrico, y además ayudan a obtener una descripción más o menos general de las cuencas y su relación con la precipitación [Ochoa et al., 2014, NO168, 2008] .

#### 2.3.2.1 Descripción de las características

##### Área de drenaje

Una cuenca hidrográfica es un área que se refiere al territorio abarcado desde el nacimiento hasta la desembocadura final de la corriente de agua. El límite de la cuenca se denomina divisoria de aguas y está compuesta por los puntos de máxima cota entre cuencas. Dicha línea separa las precipitaciones que caen en cuencas inmediatamente vecinas. El área de drenaje es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria de aguas topográfica. Se mide en *km*<sup>2</sup> o *ha*.

##### Perímetro

Es la longitud del límite exterior de la cuenca y depende de la superficie y la forma de la cuenca. Se mide siguiendo el contorno de la divisoria de aguas.

##### Parámetros de forma

La forma de una cuenca, ya sea por ejemplo alargada u ovalada, influye sobre los escurrimientos de la siguiente manera: para el primer caso el agua discurre por un solo cauce, mientras que en la de forma ovalada, los escurrimientos también ocurren en cauces secundarios hasta llegar a uno principal, por lo que la duración del escurrimiento es superior

[Ochoa, 2011].

Los índices más empleados para representar estas características son:

- Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad ( $Kc$ ): relaciona el perímetro de la cuenca con una cuenca teórica circular con igual área.

$$Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2.1)$$

donde:

$P$ : perímetro de la cuenca ( $km$ )

$A$ : área de drenaje de la cuenca ( $km^2$ )

El valor de esta expresión siempre es mayor que 1, y aumenta con la irregularidad de la cuenca. Mientras más cercano sea a 1 hay mayor tendencia a las crecientes [Monsalve, 1995].

- Factor de forma ( $Kf$ ): según Horton es la relación entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de su longitud.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (2.2)$$

donde:

$L$ : longitud del cauce principal ( $km$ )

$A$ : área de drenaje de la cuenca ( $km^2$ )

Valores pequeños de este parámetro, muestran una tendencia de la cuenca a presentar unas crecientes lentas y sostenidas [Ochoa, 2011], y tomará valores inferiores a 1 en cuencas alargadas [Jardí, 1985].

### Parámetros de drenaje

Como se sabe, la red hidrográfica es el drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos de la cuenca. Los ríos son los principales agentes del deterioro del terreno, y accesoriamente del transporte y depósito del mismo [Pourrut et al., 1995]. La red hidrográfica superficial se analiza a través de los siguientes parámetros:

- Densidad de drenaje: es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su superficie.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (2.3)$$

donde:  $Lt$ : longitud total de las corrientes de agua ( $km$ ) halladas en función del DEM para la zona de estudio

$A$ : área de drenaje de la cuenca ( $km^2$ )

La densidad de drenaje usualmente toma valores entre  $0.5 \text{ km/km}^2$  para cuencas con drenaje pobre hasta  $3.5 \text{ km/km}^2$  para cuencas excepcionalmente bien drenadas [Monsalve, 1995].

- Extensión media de la escorrentía superficial: se define como la distancia media en la que el agua de lluvia tendrá que escurrir sobre los terrenos de una cuenca en caso de que la escorrentía se diese en línea recta sobre los terrenos de una cuenca donde la lluvia cayó hasta el punto más próximo al lecho de una corriente cualquiera de la cuenca [Monsalve, 1995].

$$l = \frac{A}{4Lt} \quad (2.4)$$

donde:  $Lt$ : longitud total de las corrientes de agua ( $\text{km}$ )

$A$ : área de drenaje de la cuenca ( $\text{km}^2$ )

- Sinuosidad de las corrientes de agua: es la relación entre la longitud del río principal a lo largo de su cauce  $L$  y la longitud del valle del río principal medida en línea recta o curva  $La$ .

$$S = \frac{L}{La} \quad (2.5)$$

- Longitud del cauce principal: el cauce que tiene la mayor longitud desde su nacimiento hasta el punto de cierre de la cuenca. Existe solo una corriente principal por cada cuenca.
- Longitud total de los cauces: suma de las longitudes de todas las corrientes de agua dentro de la cuenca.

## Relieve

La influencia del relieve tiene un papel permanente sobre los elementos climáticos. A una mayor pendiente corresponderá una menor duración de la concentración de las aguas de escorrentía producto de las precipitaciones producidas en la zona de estudio [Pourrut et al., 1995].

La escala de valores que define y cuantifica de acuerdo a su pendiente es: Plano (0-3%), como las llanuras que están casi al nivel del mar y altiplanos se encuentran a más de 500 m; suave o ligeramente ondulado (3-7%); moderadamente ondulado (7-12%); fuertemente ondulado (12-25%); colinado (25-55%), un sistema de lomas y colinas constituido principalmente por rocas sedimentarias y areniscas, separadas o alternantes; escarpado (55-80%), un relieve en forma de crestas o montañas más viejas con cimas erosionadas y redondeadas; montañoso (mayor a 80%) que se componen de elevaciones naturales de altura considerable [Pourrut et al., 1995].

A partir del DEM (modelo digital de elevación) se genera un mapa de pendiente por medio de la herramienta "slope" de Arc Gis. El mapa de pendientes identifica la diferencia del gradiente, es decir, es una relación entre la distancia horizontal y la altitud entre dos puntos. El mapa de pendientes y relieve en la zona de estudio se encuentra en el Anexo 1 MAP08 y

Anexo 1 MAP09. Se representan gráficamente el rango de pendientes en la zona de estudio, donde predominan pendientes entre 10-30% e indican un relieve montañoso de 1852  $km^2$  cuyas alturas varían entre los 2000 y 5000  $msnm$ .

### 2.3.2.2 Subcuencas en la zona de estudio

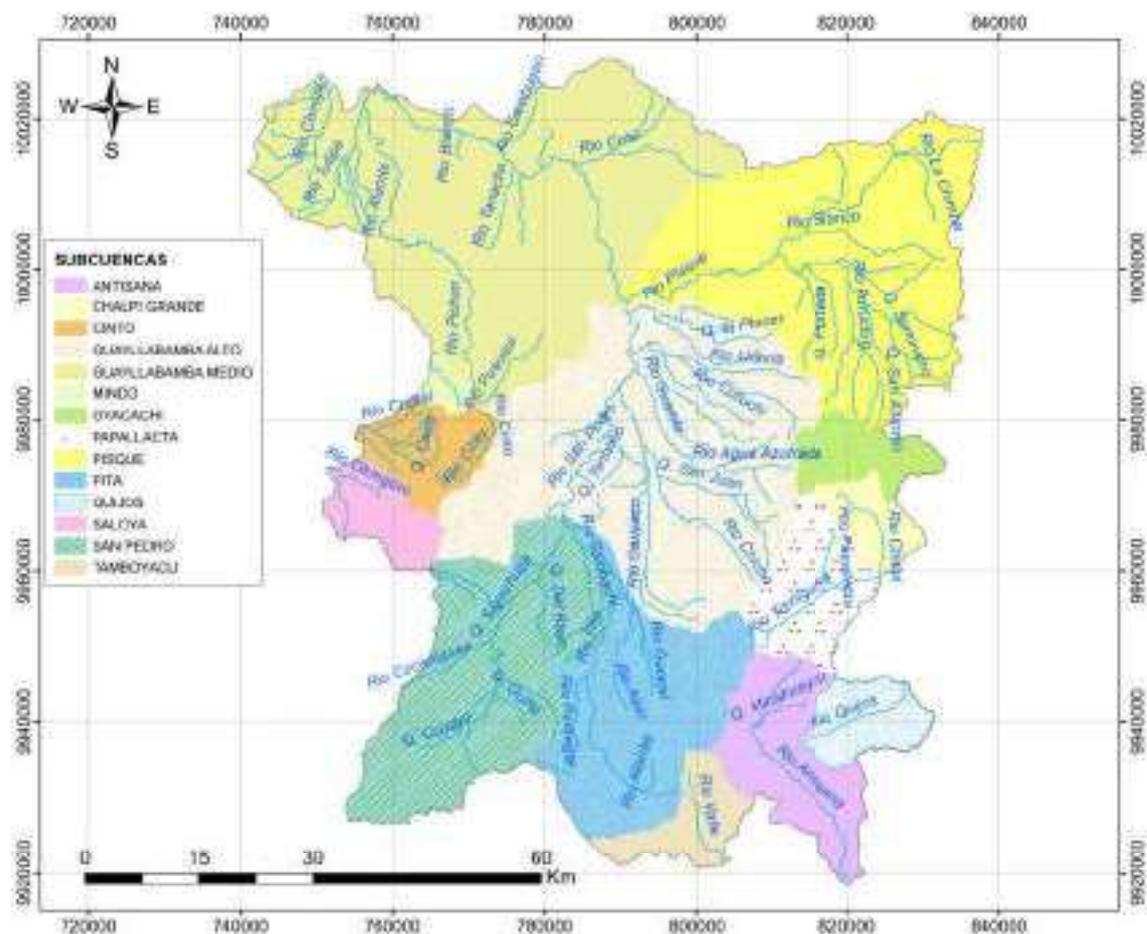
Las subcuencas que se encuentran en la zona de estudio se detallan en la Tabla 2.11 y son las que se usaron para determinar las características físico-geográficas (Tabla 2.12).

**TABLA 2.11:** Subcuencas de la Zona de estudio

Subcuenca	Área ( $km^2$ )	Perímetro ( $km$ )
Guayllabamba Medio	1582.5	221.2
Pisque	1135.6	183.78
Oyacachi	140.0	68.5
Chalpi Grande	102.0	51.4
Papallacta	244.9	79.5
Antisana	327.2	109.8
Guayllabamba Alto	1355.0	197.0
San pedro	751.2	148.4
Pita	586.0	152.0
Mindo	30.8	25.4
Cinto	171.0	63.8
Saloya	136.8	57.9
Quijos	143.55	52.7
Tamboyacu	140.2	72.5

ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 2.8 se ven representadas las subcuencas gráficamente. El mapa de subcuencas en la zona de estudio se encuentra en el Anexo 1 MAP10.



**FIGURA 2.8:** Subcuencas dentro de la Zona de Influencia FONAG-EPMAPS  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### 2.3.2.3 Análisis de las características

Se analizan las subcuencas mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En la Tabla 2.12 se presenta las principales características físico- morfológicas.

Además del área de drenaje y el perímetro se puede destacar:

- Las subcuencas presentan valores altos (1.23 - 1.76) de coeficiente de compacidad ( $Kc$ ) que indican la irregularidad y formas alargadas de las subcuencas.
- La subcuenca de Píta es la que tiene la forma más alargada según su factor de forma ( $Kf$ ), que es el más alto.
- Los valores de la densidad de drenaje de las subcuencas son cercanas a 2 ( $km/km^2$ ), lo que significa que son bien drenadas.
- La subcuenca de Guayllabamba es la que tiene la menor pendiente media, no obstante no significa que la velocidad de la escorrentía superficial será menor que las otras subcuencas, ya que la escorrentía superficial depende de otras variables.

**TABLA 2.12:** Propiedades físicas de las subcuencas dentro de la zona de estudio.

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)	L (Km)	La (Km)	Lt (Km)	Kc	Kf	Dil	I	S	Cota Máxima (msnm)	Cota Mínima (msnm)	Pendiente Media %
Artisana	327.2	109.8	36.4	30.71	638.4	1.70	0.25	1.95	1.27	1.19	5600	2400	15.8
Chalpi Grande	102.0	51.4	15.1	12.14	175.3	1.43	0.45	1.72	1.67	1.25	4200	2800	17.3
Cinto	171.0	63.8	15.0	10.05	328.2	1.37	0.76	1.92	0.77	1.50	4600	2000	20.1
Guaylabamba Alto	1355.0	197.0	43.2	38.81	2854.3	1.50	0.73	2.11	0.98	1.11	4400	1900	13.9
Guaylabamba Medio	1582.5	221.2	51.5	42.17	2997.9	1.56	0.60	1.89	1.22	1.22	4600	700	18.2
Minilo	30.8	25.4	6.2	6.67	64.3	1.28	0.80	2.09	1.24	0.93	4500	2500	24.0
Oyocachi	140.0	68.5	24.2	19.87	286.7	1.62	0.24	2.05	1.39	1.22	4400	2800	17.5
Papallacta	244.9	79.5	20.8	18.74	488.3	1.42	0.57	1.99	2.10	1.11	5600	2800	17.0
Pisique	1135.6	183.8	56.4	51.92	2329.6	1.53	0.36	2.05	0.88	1.09	5700	1900	14.2
Pita	586.0	152.0	50.5	37.81	1281.2	1.76	0.23	2.19	1.28	1.34	5800	2500	11.9
Quijos	143.6	52.7	17.1	15.22	267.5	1.23	0.49	1.86	1.18	1.13	5500	2800	19.0
Saloya	136.8	57.9	10.0	8.80	238.8	1.39	1.38	1.75	1.37	1.13	4400	2000	19.7
San Pedro	751.2	148.4	43.9	36.49	1767.4	1.52	0.39	2.35	1.62	1.20	5000	2500	12.3
Tamboyacu	140.2	72.5	13.2	12.44	264.5	1.71	0.80	1.89	0.99	1.06	5700	3600	11.1

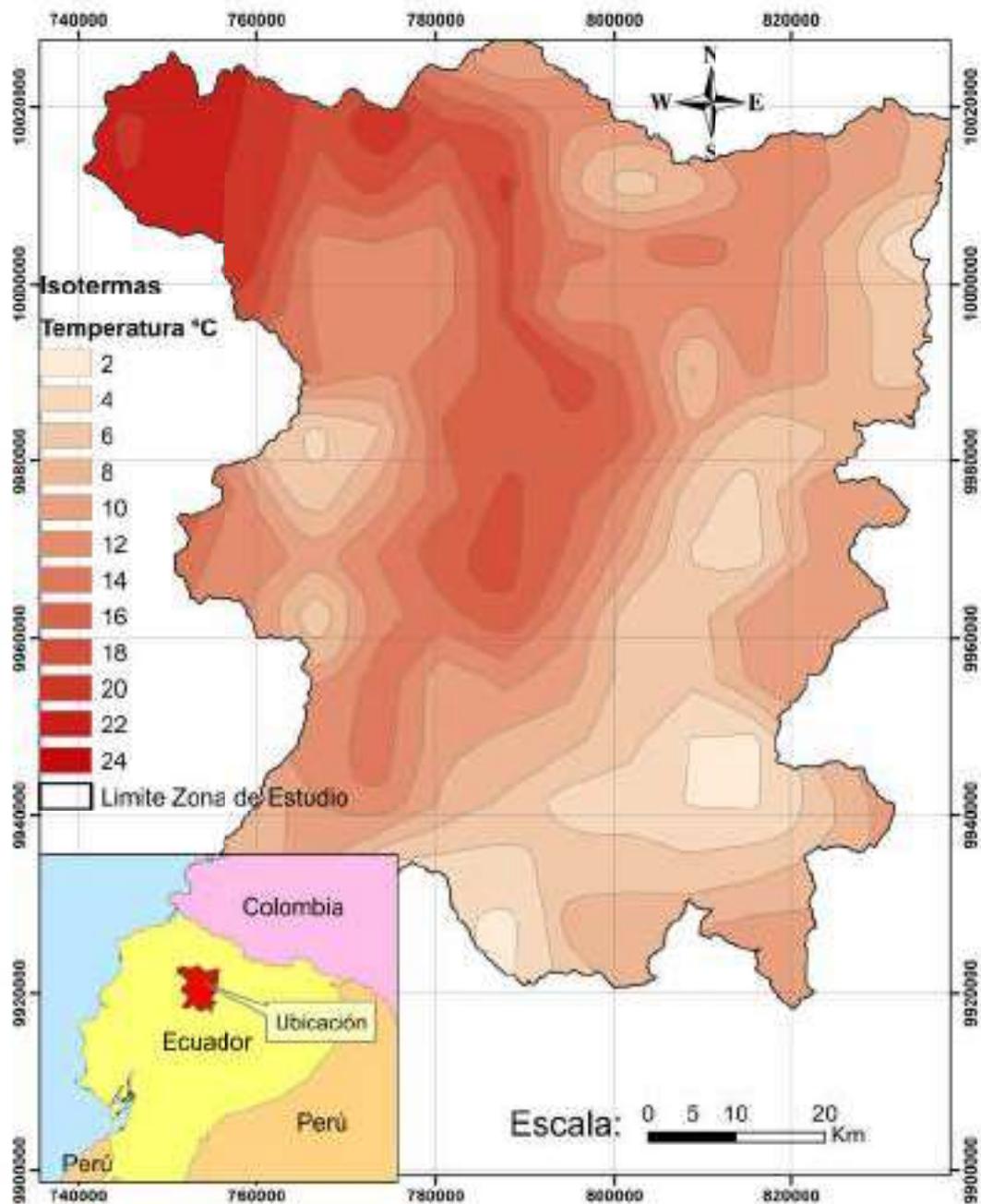
ELABORADO POR: Christian Diaz

- La mayoría de la zona tiene un relieve montañoso y escarpado, pero pendientes bajas (10-15 %) en las zonas habitadas, correspondientes a zonas urbanizadas y valles.

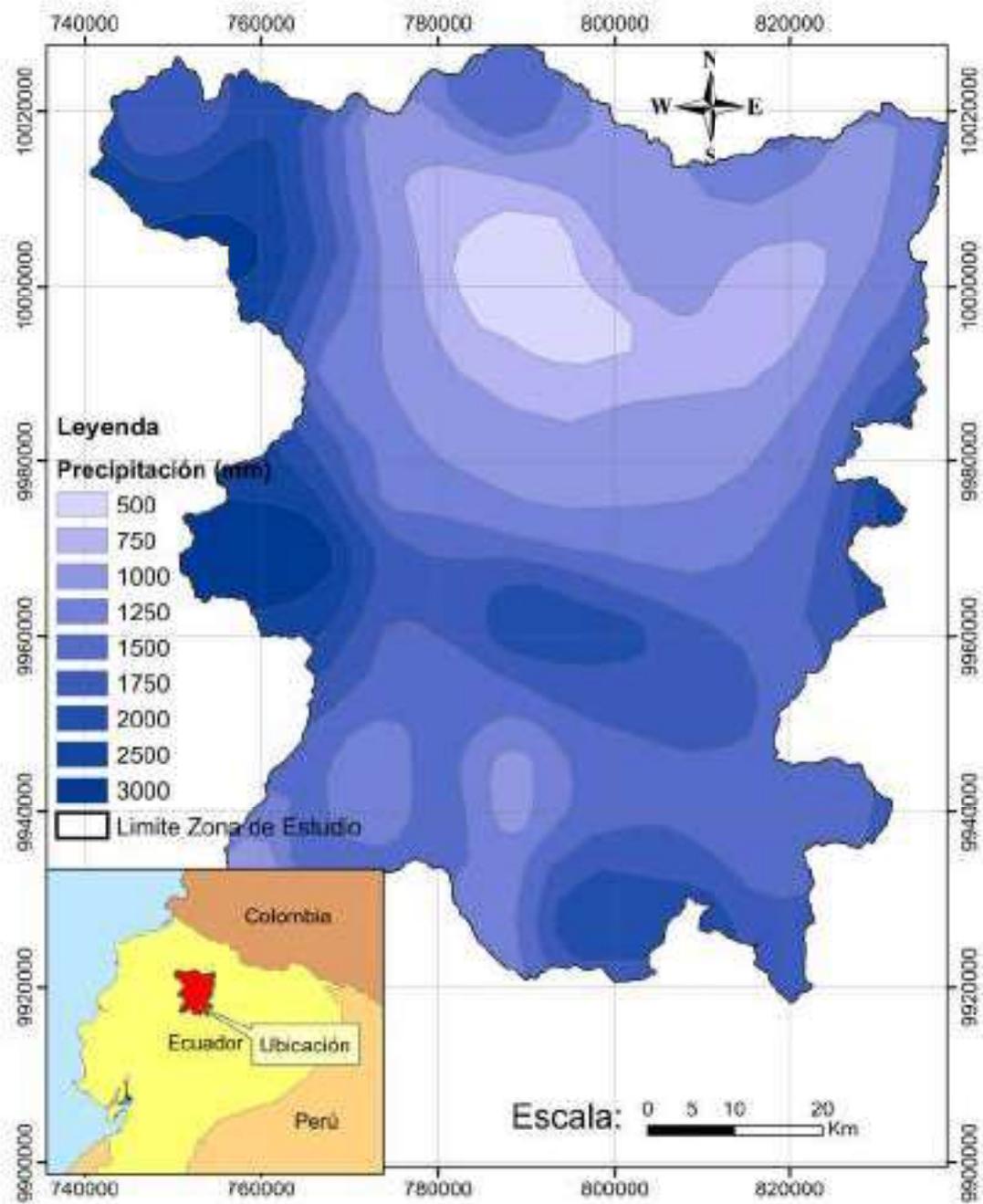
### 2.3.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima del Ecuador presenta variabilidad por distintos factores, los más relevantes son: el gradiente altitudinal causado por la cordillera de los Andes, las corrientes marinas y el fenómeno de El Niño y La Niña que afectan principalmente a la región costanera. La precipitación aumenta de oeste a este, presenta valores anuales que varían entre 250 y 6000 *mm* en las estribaciones de la cordillera amazónica y la región del Chocó biogeográfico [Pourrut et al., 1995]. Las observaciones realizadas por el INAMHI, en la región Interandina se presenta un régimen bimodal, con 2 valores altos de precipitación en marzo o abril y posteriormente en octubre o noviembre. Los períodos de menor precipitación se presentan en enero y posteriormente entre junio y septiembre.

El clima de la zona es tropical. La precipitación es significativa, con precipitaciones incluso durante el mes más seco (50 *mm*) [Pourrut et al., 1995]. La precipitación media anual se encuentra entre 400 y 1500 *mm* (Figura 2.10). La precipitación diaria para la zona de estudio oscila entre 20 y 45 *mm*. La temperatura media anual es 25.8 ° C. El clima es variable debido a la altura, desde el tropical hasta el glacial, debido a la presencia de la cordillera de los Andes y la presencia del Chocó biogeográfico al noroccidente de la zona, por lo que existe alta pluviosidad. Esta zona se haya dividido en diversos sectores climáticos. Además, a causa de su ubicación tropical, cada zona climática presenta sólo dos estaciones definidas: húmeda y seca. En el noroccidente la temperatura media anual oscila entre los 25 ° C y 15 ° C, mientras que en la zona andina, ésta suele estar entre los -3 ° C y 10 ° C (Figura 2.9).



**FIGURA 2.9:** Temperatura media anual para la zona de estudio  
 ELABORADO POR: Christian Díaz  
 Fuente: INAMHI, 2010

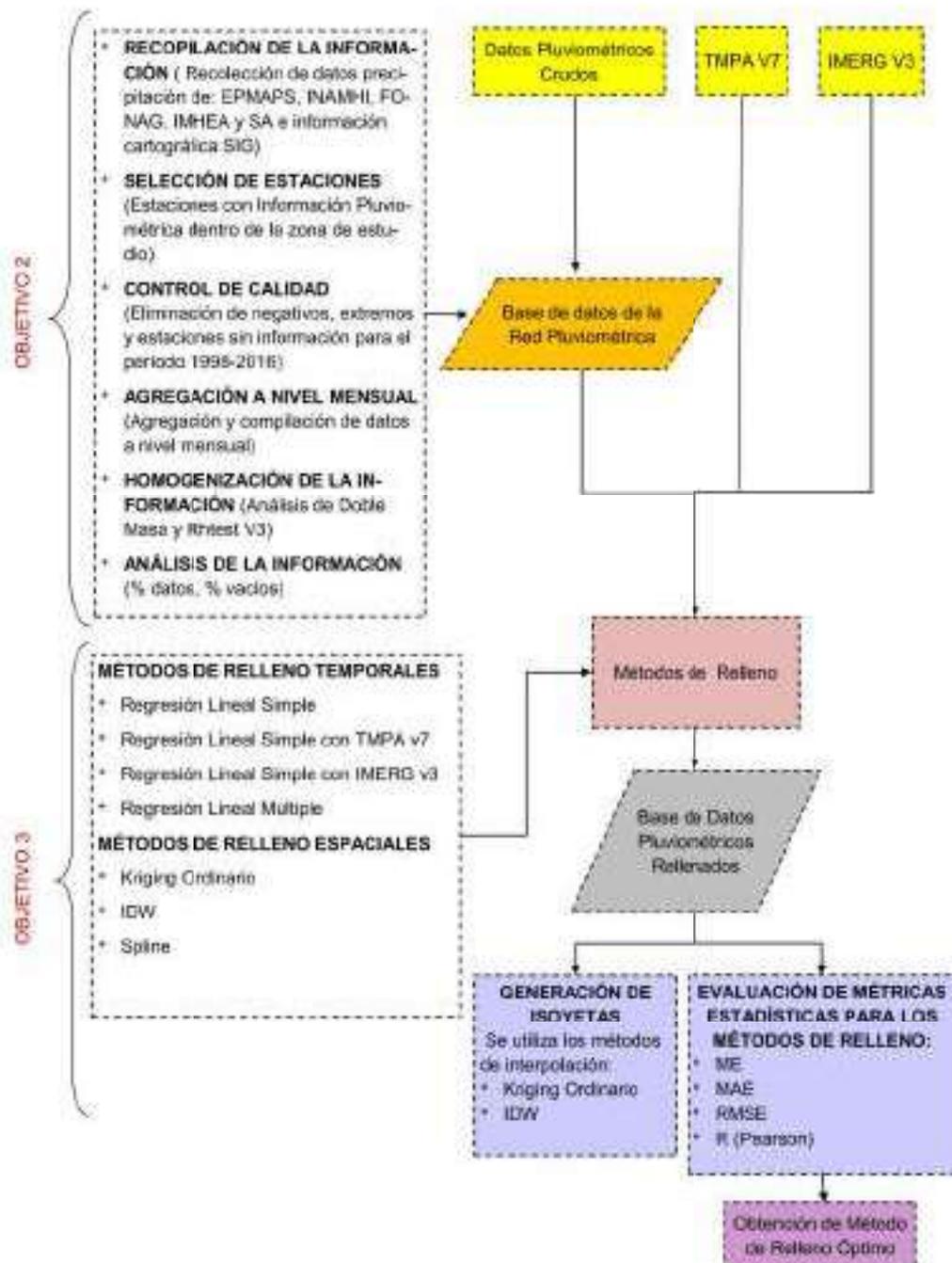


**FIGURA 2.10:** Precipitación media anual para la zona de estudio  
 ELABORADO POR: Christian Díaz  
 Fuente: INAMHI, 2010

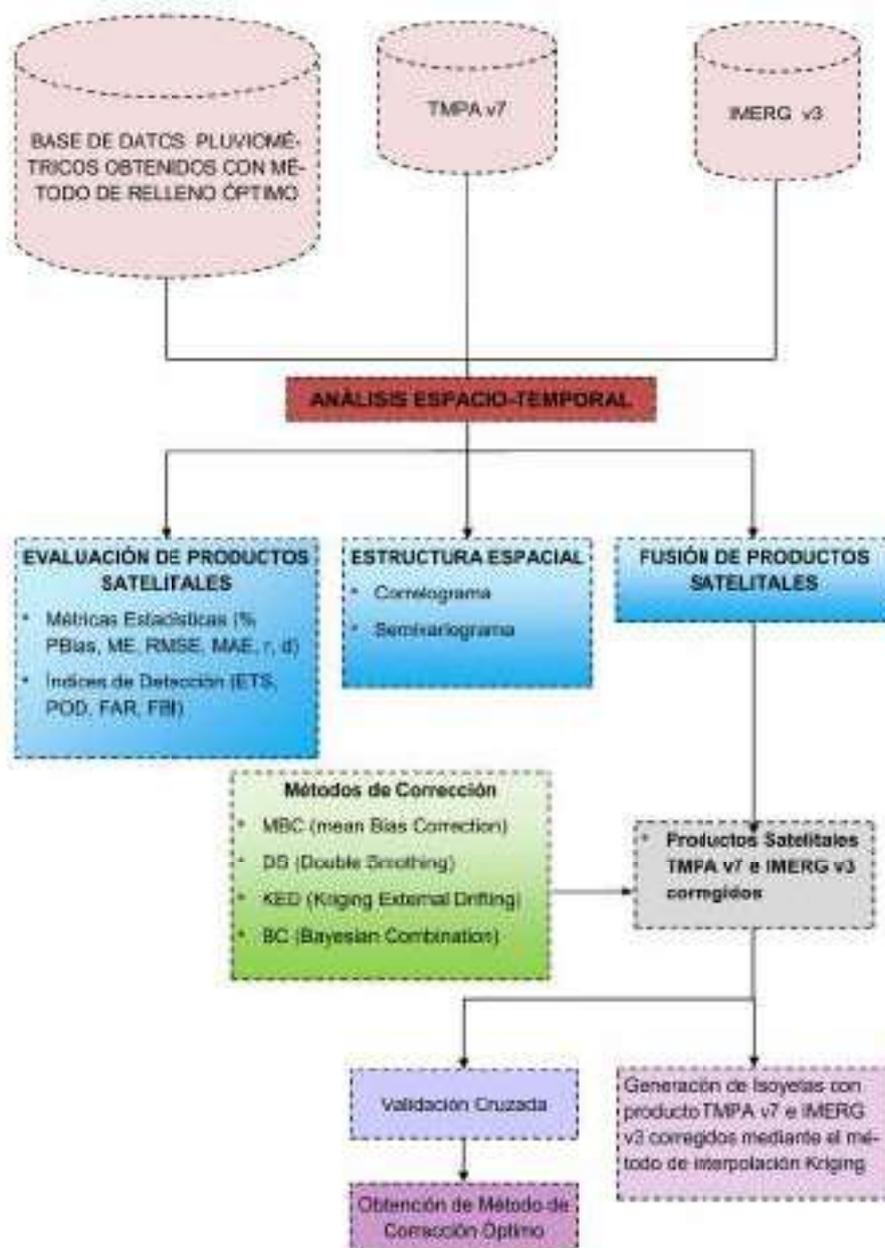
## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

A continuación en la Figura 3.1 y 3.2 se describe el proceso mediante el cual se va a obtener la información para entender, verificar, aplicar o corregir los productos de precipitación IMERG v3 y TMPA v7 para la zona de estudio.



**FIGURA 3.1:** Flujo de procesos para el Objetivo Específico 2 y 3  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 3.2:** Flujo de procesos para desarrollar el Objetivo Específico 4  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### 3.1 GENERACIÓN DE BASE PLUVIOMÉTRICA

En este capítulo se analizará las series mensuales de precipitación; dichos valores son importantes para la evaluación y comparación con las estimaciones satelitales de precipitación y servirá para la elaboración de mapas de isoyetas y corrección de productos satelitales.

Antes de emplear la información pluviométrica se debe preparar los datos de precipitación crudos. Para esto se clasifican las estaciones en función del número de años de registro y

posteriormente se seleccionan las estaciones correspondientes al período y zona de estudio.

### 3.1.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

Para el caso de este estudio, se considera únicamente la precipitación de distintas instituciones de la Red Meteorológica Nacional y la información de precipitación de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3. Adicionalmente, se ha recopilado la información disponible de tipo cartográfica (Red de estaciones con información pluviométrica).

#### 3.1.1.1 Información Cartográfica

La información cartográfica se adquirió de distintas instituciones nacionales. La mayoría de la información utilizada se encuentra disponible en el Sistema Nacional de Información (SNI). Las características de la información se encuentran en la Tabla 3.1:

**TABLA 3.1:** Información cartográfica utilizada para el proyecto

Información Cartográfica	Formato	Año	Escala	Descripción	Institución Responsable
Red estaciones meteorológicas INAMHI	Vector	2013	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	INAMHI
Red estaciones meteorológicas EPMAPS	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	EPMAPS
Red estaciones meteorológicas FONAG	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	FONAG
Red estaciones meteorológicas IMHEA	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	IMHEA
Red estaciones meteorológicas SA	Vector	2016	1:50000	Ubicación de las estaciones meteorológicas del Ecuador	Secretaría del Ambiente

ELABORADO POR: Christian Díaz

#### 3.1.1.2 Información Pluviométrica

Para el estudio, se considera únicamente la precipitación observada por los pluviómetros de distintas instituciones nacionales. Se utilizan los valores de precipitación de INAMHI, EPMAPS, FONAG, IMHEA y SA, con su respectiva resolución temporal: 5 min, 30 min, horaria y diaria. Se realizó la agregación a escala diaria y mensual para todas las estaciones por medio del software R Studio, ya que la resolución temporal para el análisis es a nivel mensual.

La información recopilada de las 5 instituciones se constituye por: los datos de INAMHI correspondientes a 53 estaciones, FONAG con 16 estaciones, IMHEA posee 12 estaciones, SA tiene 7 estaciones y EPMAPS cuenta con 70 estaciones, que dan un total de 158 estaciones.

**TABLA 3.2:** Resolución y temporalidad de Estaciones según la Institución

Institución	Resolución Temporal	Periodo de Información
EPMAPS	5 min	2000-2016
INAMHI	diaria	1965-2016
IMHEA	5 min	2000-2016
FONAG	horaria	2007-2016
SA	horaria	2004-2016

ELABORADO POR: Christian Díaz

Los pluviómetros están ubicados en zonas dentro de las 14 subcuencas en que se encuentra dividida la zona de estudio. Existen ciertas limitaciones debido a la ausencia de datos en ciertos períodos, como por ejemplo, el último anuario publicado por el INAMHI, es del año 2012. Los datos pluviométricos provenientes de EPMAPS, en su mayoría, existen a partir del año 2000 y algunas estaciones se encuentran inhabilitadas. En el caso de IMHEA existe información desde 2014 al año 2016, para la SA se cuenta con información a partir de 2004 y en ambos casos esta información está incompleta.

La ubicación de las estaciones con información pluviométrica recopilada se presenta en la Tabla 3.3.

**TABLA 3.3:** Ubicación de todos los pluviómetros al inicio de la recopilación.

No.	Estación	Código	Institución	Coord. UTM Zona 17 S	
				X (m)	Y (m)
1	Maucatambo	C01	EPMAPS	795679.0	9924698.8
2	Rumihurco	C02	EPMAPS	774101.5	9985645.4
3	Rumihurco	C03	EPMAPS	776000.0	9986550.0
4	Rumipamba	C04	EPMAPS	774790.3	9980593.2
5	Bellavista	C05	EPMAPS	782540.9	9979903.6
6	Yaruquí	C06	EPMAPS	799837.1	9981813.4
7	San Antonio	C07	EPMAPS	783242.9	9997963.3
8	IASA	C08	EPMAPS	787804.5	9956633.1
9	La Mica Campamento	C09	EPMAPS	809017.0	9942407.0
10	La Mica Presa	C10	EPMAPS	808537.1	9939530.3
11	Pita Campamento	C11	EPMAPS	785139.7	9945104.9
12	Quijos Campamento	C12	EPMAPS	828771.0	9947662.0
13	Salve Faccha	C13	EPMAPS	816985.0	9974472.0
14	Rumihurco Machángara	P03	EPMAPS	775301.4	9985542.6
15	Rumihurco Occidental	P05	EPMAPS	777375.0	9987150.0
16	Rumipamba Bodegas	P08	EPMAPS	777167.5	9979984.8
17	Iñaquito INAMHI	P09	EPMAPS	779647.2	9980267.4
18	DAC Aeropuerto	P10	EPMAPS	779420.2	9983846.5
19	Antenas	P11	EPMAPS	775601.6	9981632.3
20	Toctiuco	P12	EPMAPS	775237.2	9977178.4
21	Cumbayá	P13	EPMAPS	789536.5	9973883.2
22	Zámbiza	P14	EPMAPS	784246.9	9983670.9
23	El Cinto	P15	EPMAPS	770495.9	9972531.1
24	Izobamba	P16	EPMAPS	772129.3	9959515.0

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 3.3:** Ubicación de todos los pluviómetros al inicio de la recopilación. (cont...)

No.	Estación	Código	Institución	Coord. UTM Zona 17 S	
				X (m)	Y (m)
25	El Tingo	P17	EPMAPS	784610.5	9967502.7
26	La Tola (Tumbaco)	P19	EPMAPS	792960.0	9974720.0
27	Calderón	P20	EPMAPS	785698.1	9991396.1
28	R.Grande 1 (Chillog)	P21	EPMAPS	769180.0	9968820.0
29	Chillogallo	P22	EPMAPS	768726.3	9969225.1
30	Atacazo	P23	EPMAPS	766938.0	9964785.4
31	Observatorio	P24	EPMAPS	778260.0	9976580.0
32	El Troje	P25	EPMAPS	775644.3	9963117.8
33	Puengasí	P26	EPMAPS	779043.6	9973816.1
34	San Francisco	P27	EPMAPS	773854.5	9977631.1
35	Cruz Loma	P28	EPMAPS	774045.4	9979837.6
36	Palmira	P29	EPMAPS	763305.8	9973925.0
37	Santa Rosa	P30	EPMAPS	766845.1	9971789.1
38	Pichán	P31	EPMAPS	770307.5	9987187.3
39	Mindo Bajo	P32	EPMAPS	767625.0	9985275.0
40	Nunalviro	P33	EPMAPS	809970.0	9971618.0
41	Papallacta	P34	EPMAPS	818480.0	9958251.0
42	Bocatoma Pita	P35	EPMAPS	785296.0	9945417.0
43	Salve Faccha	P37	EPMAPS	816830.0	9974475.0
44	San Simón	P38	EPMAPS	817489.0	9942660.0
45	Yangahuagra	P39	EPMAPS	793328.3	9926789.3
46	Tambo 2a	P40	EPMAPS	794093.4	9916815.9
47	Guayllabamba Hacienda	P41	EPMAPS	795218.6	9990664.1
48	Antisana R. Huañuna	P42	EPMAPS	811790.7	9933392.2
49	Antisana Limboasi	P43	EPMAPS	810735.3	9934380.0
50	Guaytaloma	P44	EPMAPS	820380.7	9967063.4
51	El Quinche	P45	EPMAPS	801534.7	9987680.5
52	Chalpi Grande	P46	EPMAPS	824453.2	9960762.2
53	Mindo Captación	P48	EPMAPS	768460.8	9983469.6
54	Pintag	P52	EPMAPS	792050.1	9959874.8
55	El Carmen	P54	EPMAPS	793282.2	9949720.2
56	Antisana Diguchi	P55	EPMAPS	809916.0	9937000.0
57	Tanque Solanda	P56	EPMAPS	774849.2	9968830.8
58	Nanegalito	P58	EPMAPS	758053.0	10007315.0
59	Calacalí	P59	EPMAPS	776646.0	10000783.5
60	San José de Minas	P60	EPMAPS	787940.4	10019185.3
61	Perucho	P61	EPMAPS	786982.6	10012231.7
62	Blanco Chico Alto	P62	EPMAPS	817868.7	9949872.0
63	La Virgen Papallacta	P63	EPMAPS	809466.0	9965998.0
64	Laguna Encantada	P64	EPMAPS	825850.9	9968879.5
65	Laguna Santa Lucía	P65	EPMAPS	814132.0	9948675.0
66	Relleno El Inga	P67	EPMAPS	794321.3	9967458.6

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 3.3:** Ubicación de todos los pluviómetros al inicio de la recopilación. (cont...)

No.	Estación	Código	Institución	Coord. UTM Zona 17 S	
				X (m)	Y (m)
67	Salve Faccha Alto	P68	EPMAPS	814533.0	9974680.0
68	CC El Bosque	P70	EPMAPS	778568.9	9982111.1
69	Collaloma Medio	P71	EPMAPS	781259.6	9986434.7
70	Colinas Alto	P72	EPMAPS	775708.3	9988623.1
71	LA TOLA	M0002	INAMHI	793125.4	9974612.5
72	IZOBAMBA	M0003	INAMHI	772701.4	9959435.0
73	LA VICTORIA INERHI	M0009	INAMHI	811632.9	9993360.2
74	MONTESERRIN	M0010	INAMHI	802503.6	9993391.4
75	TABACUNDO H.MOJANDA	M0022	INAMHI	807795.4	10005871.1
76	OLMEDO-PICHINCHA	M0023	INAMHI	828654.0	10016386.5
77	QUITO INAMHI-INNAQUITO	M0024	INAMHI	780131.9	9981560.4
78	MALCHINGUI INAMHI	M0111	INAMHI	796964.8	10006147.3
79	CONOCOTO	M0112	INAMHI	781738.7	9970434.9
80	UYUMBICHO	M0113	INAMHI	775454.7	9957037.2
81	TUMBACO	M0114	INAMHI	787865.7	9974183.2
82	SAN ANTONIO DE PICHINCHA	M0115	INAMHI	785299.9	9998862.9
83	MACHACHI INIAP-	M0117	INAMHI	773747.6	9942010.0
84	SUPLEMENTARIA PORCINOS	M0118	INAMHI	778271.2	9961277.4
85	COTOPAXI-CLIRSEN	M0120	INAMHI	769195.4	9931041.1
86	PAPALLACTA	M0188	INAMHI	817847.0	9959606.0
87	VINDOBONA	M0210	INAMHI	789229.5	10000061.5
88	LA VINNA DE CHESPI	M0211	INAMHI	774563.1	10012907.2
89	LA PERLA	M0213	INAMHI	759403.4	10021325.5
90	PERUCHO INECEL	M0214	INAMHI	786970.1	10012416.6
91	CEEA-AYCHAPICHO	M0291	INAMHI	767903.5	9949295.3
92	LA CHORRERA	M0335	INAMHI	774375.9	9977689.0
93	PACTO	M0336	INAMHI	748917.0	10016192.8
94	SAN JOSE DE MINAS	M0337	INAMHI	790186.9	10018686.8
95	NANEGALITO	M0339	INAMHI	758630.6	10007374.8
96	GUAYLLABAMBA	M0341	INAMHI	795758.0	9993699.1
97	COTOCOLLAO	M0342	INAMHI	778864.0	9989243.7
98	EL QUINCHE-PICHINCHA	M0343	INAMHI	800182.2	9988688.8
99	CANGAHUA	M0344	INAMHI	815346.6	9993667.4
100	CALDERON	M0345	INAMHI	787094.3	9989120.1
101	YARUQUI INAMHI	M0346	INAMHI	798851.4	9982326.4
102	PUEMBO	M0347	INAMHI	794333.2	9980513.5

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

TABLA 3.3: Ubicación de todos los pluviómetros al inicio de la recopilación. (cont...)

No.	Estación	Código	Institución	Coord. UTM Zona 17 S	
				X (m)	Y (m)
103	HDA.PINANTURA(LA COCHA)	M0349	INAMHI	794358.0	9952974.3
104	SANGOLQUI	M0352	INAMHI	785697.0	9963119.4
105	RUMIPAMBA-PICHINCHA	M0353	INAMHI	787643.4	9952700.0
106	SAN JUAN-PICHINCHA(CHILLOG.)	M0354	INAMHI	763515.8	9968502.6
107	CANAL 4 TV.	M0356	INAMHI	776140.5	9981560.9
108	CANAL 10 TV.	M0357	INAMHI	775769.2	9981776.1
109	CALACALI INAMHI	M0358	INAMHI	776884.4	10000153.7
110	CAYAMBE	M0359	INAMHI	818441.5	10005963.8
111	NONO	M0361	INAMHI	770170.3	9991887.1
112	LORETO PEDREGAL	M0364	INAMHI	786461.5	9937886.6
113	CUMBAYA	M0572	INAMHI	786412.4	9978732.1
114	HDA.JERUSALEN	M0574	INAMHI	794922.7	10000338.1
115	CAJAS PEDREGAL	M0577	INAMHI	792553.1	9929523.8
116	NANEGAL	M0587	INAMHI	758661.5	10015548.5
117	QUITO-U.CENTRAL	M0606	INAMHI	778274.3	9976028.9
118	GUAYCUYACU	M0612	INAMHI	742142.4	10015700.5
119	LLULLUCHIS	M0730	INAMHI	764209.8	9933458.7
120	HDA.MI CIELO(PV18)	M0913	INAMHI	777192.6	9981653.0
121	PAPALLACTA INECEL	M1073	INAMHI	819117.1	9963110.2
122	TOMALON-TABACUNDO	M1094	INAMHI	807981.6	10003688.7
123	POMASQUI	M1200	INAMHI	783845.7	9994468.0
124	Salvefacha Oyacachi	M5021	FONAG	821647.0	9979154.0
125	Pluviométrica Control Baños	M5022	FONAG	817507.0	9964050.0
126	Pluviométrica Papallacta	M5023	FONAG	818242.0	9958152.0
127	El Tambo	M5024	FONAG	812125.0	9958004.0
128	La Virgen Papallacta	M5025	FONAG	811859.0	9963068.0
129	Cotopaxi Control Norte	M5026	FONAG	784573.0	9937618.0
130	Loma Urco Ilinizas	M5027	FONAG	760317.0	9936280.0
131	Miranda completa	M5028	FONAG	790439.0	9946524.0
132	El Carmen completa	M5029	FONAG	796826.0	9944491.0
133	Gordillo Pluviométrica	M5030	FONAG	794173.0	9953712.0
134	Chumillos completa	M5031	FONAG	810520.0	9989510.0
135	M.Puntas	M5074	FONAG	809389.0	9981721.0
136	M.Itulcachi	M5075	FONAG	804574.0	9967879.0
137	P.Mudadero	M5076	FONAG	789148.0	9931750.0
138	P.REI	M5077	FONAG	757174.0	9930365.0

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 3.3:** Ubicación de todos los pluviómetros al inicio de la recopilación. (cont...)

No.	Estación	Código	Institución	Coord. UTM Zona 17 S	
				X (m)	Y (m)
139	P_Pifo	M5078	FONAG	798647.0	9973342.0
140	LLO.01.PO.01	LLO.01.PO.01	IMHEA	768271.4	9978335.5
141	LLO.01.PO.02	LLO.01.PO.02	IMHEA	768316.1	9978001.7
142	LLO.02.PO.01	LLO.02.PO.01	IMHEA	768747.3	9979486.3
143	LLO.02.PO.02	LLO.02.PO.02	IMHEA	768688.4	9980171.2
144	JTU.01.PT.11	JTU.01.PT.11	IMHEA	807522.0	9944182.0
145	JTU.01.PT.22	JTU.01.PT.22	IMHEA	807300.0	9945934.0
146	JTU.01.PT.32	JTU.01.PT.32	IMHEA	806765.0	9946131.0
147	JTU.01.PT.42	JTU.01.PT.42	IMHEA	808207.0	9948064.0
148	JTU.01.PT.52	JTU.01.PT.52	IMHEA	806824.0	9947710.0
149	JTU.01.PT.63	JTU.01.PT.63	IMHEA	808170.0	9948210.0
150	JTU.01.PT.73	JTU.01.PT.73	IMHEA	808555.0	9948148.0
151	JTU.01.PT.83	JTU.01.PT.83	IMHEA	810383.0	9948353.0
152	CARAPUNGO	CARAPUNGO	SA	784154.0	9989120.0
153	COTOCOLLAO	COTOCOLLAO	SA	778585.0	9988076.0
154	BELISARIO	BELISARIO	SA	779389.0	9980085.0
155	EL CAMAL	EL CAMAL	SA	777160.0	9972341.0
156	GUAMANI	GUAMANI	SA	772548.0	9963399.0
157	TUMBACO	TUMBACO	SA	789413.0	9976765.0
158	LOS CHILLOS	LOS CHILLOS	SA	782728.0	9966808.0

ELABORADO POR: Christian Díaz

### 3.1.1.3 Información Pluviométrica de los productos satelitales

En cuanto a la información de los productos satelitales, se utilizan los datos mensuales de IMERG v3 y TMPA 3B43 v7 a escala espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  y  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  respectivamente. Los datos de TMPA- 3B43 v7 e IMERG v3 se descargan en formato .netCDF y se obtienen gratuitamente de la base de datos de la NASA. TMPA v7 fue obtenida de: (<http://mirador.gsfc.nasa.gov>) para el período Enero 1998 - Diciembre 2016 e IMERG v3 de (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) para el período Abril 2014 - Diciembre 2016. El manual para la descarga se encuentra en el Anexo 4 y Anexo 5.

### 3.1.2 SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

Antes de realizar la correlación y el relleno de datos se recomienda revisar la cantidad de información y huecos (vacíos), si el número de vacíos es considerable ( $>20\%$ ) se descartará toda la estación. Sin embargo, en algunos casos a pesar de que el porcentaje de vacíos en las estaciones es mayor al  $20\%$  se empleará la información en las zonas donde se carece de información y sea importante considerarla.

Para efectuar el análisis de las estaciones se clasifican según la cantidad de información que esté disponible. Dada la falta de información el criterio que se ha considerado es el detallado en la Tabla 3.4:

**TABLA 3.4:** Criterio de clasificación de estaciones según datos

Clase	Años de registro
A	mayor a 20 años
B	entre 10 y 20 años
C	entre 5 y 10 años
D	menor a 5 años

ELABORADO POR: Christian Díaz.

De las 5 instituciones que cuentan con información pluviométrica, el total de estaciones dentro del ámbito de FONAG-EPMAPS suman 158 estaciones. Después del proceso de la organización y selección de la información se debe notar lo siguiente:

- Dentro de las estaciones que administra la EPMAPS la estación P21 y C03 fueron desinstaladas. Y ahora se tiene a las estaciones C02 Rumihurco y la P22 Chillolallo.
- De la información del INAMHI no se tienen datos de las estaciones: M0264 Yaruquí INERHI, M0914 Rumipamba INERHI, M0917 Puengasí, M0954 Cruz Loma-Antenas.
- Existen estaciones de INAMHI que fueron desinstaladas antes de 1998 por lo que fueron descartadas del estudio.

Se verificó la existencia de información para el caso de INAMHI e IMHEA. En algunos casos se descartaron estaciones por: ausencia de datos para el período de estudio, por tener información menor a 1 año de registro o por localizarse fuera del área de estudio. En lo que concierne a la EPMAPS las estaciones con información de precipitación en su mayoría han sido validadas hasta el año 2016. En la reunión llevada a cabo en el FONAG el día viernes 29 de agosto del 2016, se solicitó adicionar todas las estaciones administradas por esta institución, ya que su localización corresponde a zonas de escasa información. De las 16 estaciones con datos de precipitación del FONAG, 2 cumplen con el criterio de 10 años de registro y las restantes presentan alrededor de 5 años de registro pluviométrico. Siguiendo esta lógica, se incluyen las estaciones de la Secretaría del Ambiente de Quito, estas estaciones cuentan con nueve años de información. Para desarrollar el estudio se descartaron 25 estaciones con información fuera del período de estudio y 2 estaciones que están fuera de la zona de estudio, de esta selección resultan 131 estaciones.

La ubicación de los pluviómetros seleccionados se presenta en la Tabla 3.5.

**TABLA 3.5:** Ubicación de los pluviómetros empleados para realizar la evaluación de la distribución espacio-temporal de la precipitación.

No.	Subcuenca	Estación	Institución	Alt. (m)	Coord. UTM Zona 17 S	
					X (m)	Y (m)
1		C09	EPMAPS	3964	809017.0	9942407.0
2		C10	EPMAPS	3957	808537.1	9939530.3
3		JTU.01.PT.11	IMHEA	4023	807522.0	9944182.0
4		JTU.01.PT.22	IMHEA	4075	807300.0	9945934.0
5		JTU.01.PT.32	IMHEA	4148	806765.0	9946131.0
6		JTU.01.PT.42	IMHEA	4144	808207.0	9948064.0
7	ANTISANA	JTU.01.PT.52	IMHEA	4271	806824.0	9947710.0

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 3.5:** Ubicación de los pluviómetros empleados para realizar la evaluación de la distribución espacio-temporal de la precipitación. (cont...)

No.	Subcuenca	Estación	Institución	Alt. (m)	Coord. UTM Zona 17 S	
					X (m)	Y (m)
8		JTU.01.PT.63	IMHEA	4203	808170.0	9948210.0
9		JTU.01.PT.73	IMHEA	4231	808555.0	9948148.0
10		JTU.01.PT.83	IMHEA	4289	810383.0	9948353.0
11		P42	EPMAPS	3669	811790.7	9933392.2
12		P43	EPMAPS	3669	810735.3	9934380.0
13		P55	EPMAPS	3945	809916.0	9937000.0
14	CHALPI GRANDE	P44	EPMAPS	3747	820380.7	9967063.4
15		P46	EPMAPS	2820	824453.2	9960762.2
16		P64	EPMAPS	4382	825850.9	9968879.5
17	CINTO	LLO.01.PO.01	IMHEA	3898	768271.4	9978335.5
18		LLO.01.PO.02	IMHEA	4077	768316.1	9978001.7
19		LLO.02.PO.01	IMHEA	4144	768747.3	9979486.3
20		LLO.02.PO.02	IMHEA	4220	768688.4	9980171.2
21		M0354	INAMHI	3440	763515.8	9968502.6
22		P29	EPMAPS	2719	763305.8	9973925.0
23		P30	EPMAPS	2920	766845.1	9971789.1
24	GUAYLL. ALTO	BELISARIO	SA	2835	779389.0	9980085.0
25		C04	EPMAPS	3340	774790.3	9980593.2
26		C05	EPMAPS	2962	782540.9	9979903.6
27		C06	EPMAPS	2728	799837.1	9981813.4
28		EL CAMAL	SA	2840	777160.0	9972341.0
29		GUAMANI	SA	3066	772548.0	9963399.0
30		M0002	INAMHI	2480	793125.4	9974612.5
31		M0010	INAMHI	2600	802503.6	9993391.4
32		M0024	INAMHI	2789	780131.9	9981560.4
33		M0114	INAMHI	2348	787865.7	9974183.2
34		M0335	INAMHI	3165	774375.9	9977689.0
35		M0341	INAMHI	2150	795758.0	9993699.1
36		M0343	INAMHI	2605	800182.2	9988688.8
37		M0345	INAMHI	2645	787094.3	9989120.1
38		M0346	INAMHI	2600	798851.4	9982326.4
39		M0357	INAMHI	3780	775769.2	9981776.1
40		M5031	FONAG	3750	810520.0	9989510.0
41		M5074	FONAG	4142	809389.0	9981721.0
42		M5075	FONAG	4029	804574.0	9967879.0
43		M5078	FONAG	2857	798647.0	9973342.0
44		P08	EPMAPS	3200	777167.5	9979984.8
45		P09	EPMAPS	2789	779647.2	9980267.4
46		P10	EPMAPS	2794	779420.2	9983846.5
47		P11	EPMAPS	3760	775601.6	9981632.3
48		P12	EPMAPS	3225	775237.2	9977178.4

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 3.5:** Ubicación de los pluviómetros empleados para realizar la evaluación de la distribución espacio-temporal de la precipitación. (cont...)

No.	Subcuenca	Estación	Institución	Alt. (m)	Coord. UTM Zona 17 S	
					X (m)	Y (m)
49		P13	EPMAPS	2410	789536.5	9973883.2
50		P14	EPMAPS	2640	784246.9	9983670.9
51		P15	EPMAPS	3200	770495.9	9972531.1
52		P17	EPMAPS	2519	784610.5	9967502.7
53		P19	EPMAPS	2500	792960.0	9974720.0
54		P21	EPMAPS	3090	769180.0	9968820.0
55		P22	EPMAPS	3203	768726.3	9969225.1
56		P23	EPMAPS	3865	766938.0	9964785.4
57		P24	EPMAPS	2820	778260.0	9976580.0
58		P25	EPMAPS	3145	775644.3	9963117.8
59		P26	EPMAPS	2980	779043.6	9973816.1
60		P27	EPMAPS	3554	773854.5	9977631.1
61		P28	EPMAPS	4012	774045.4	9979837.6
62		P33	EPMAPS	4150	809970.0	9971618.0
63		P41	EPMAPS	2403	795218.6	9990664.1
64		P45	EPMAPS	2650	801534.7	9987680.5
65		P52	EPMAPS	2863	792050.1	9959874.8
66		P56	EPMAPS	2880	774849.2	9968830.8
67		P63	EPMAPS	4300	809466.0	9965998.0
68		P67	EPMAPS	2647	794321.3	9967458.6
69		P70	EPMAPS	2895	778568.9	9982111.1
70		TUMBACO	SA	2331	789413.0	9976765.0
71		C02	EPMAPS	3619	774101.5	9985645.4
72		C03	EPMAPS	3200	776000.0	9986550.0
73		C07	EPMAPS	2487	783242.9	9997963.3
74		CARAPUNGO	SA	2660	784154.0	9989120.0
75		COTOCOLLAO	SA	2781	778585.0	9988076.0
76		M0337	INAMHI	2440	790186.9	10018686.8
77		M0339	INAMHI	1580	758630.6	10007374.8
78		M0358	INAMHI	2810	776884.4	10000153.7
79		M0361	INAMHI	2710	770170.3	9991887.1
80	GUAYLL. MEDIO	M1200	INAMHI	2402	783845.7	9994468.0
81		P03	EPMAPS	3308	775301.4	9985542.6
82		P05	EPMAPS	2880	777375.0	9987150.0
83		P20	EPMAPS	2765	785698.1	9991396.1
84		P31	EPMAPS	3580	770307.5	9987187.3
85		P58	EPMAPS	1626	758053.0	10007315.0
86		P59	EPMAPS	2920	776646.0	10000783.5
87		P60	EPMAPS	2469	787940.4	10019185.3
88		P61	EPMAPS	1886	786982.6	10012231.7
89		P71	EPMAPS	2953	781259.6	9986434.7

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 3.5:** Ubicación de los pluviómetros empleados para realizar la evaluación de la distribución espacio-temporal de la precipitación. (cont...)

No.	Subcuenca	Estación	Institución	Alt. (m)	Coord. UTM Zona 17 S	
					X (m)	Y (m)
90		P72	EPMAPS	3083	775708.3	9988623.1
91	MINDO	P32	EPMAPS	3200	767625.0	9985275.0
92		P48	EPMAPS	3800	768460.8	9983469.6
93	OYACACHI	C13	EPMAPS	3849	816985.0	9974472.0
94		M5021	FONAG	3710	821647.0	9979154.0
95		P37	EPMAPS	3849	816830.0	9974475.0
96		P68	EPMAPS	3920	814533.0	9974680.0
97	PAPALLACTA	M0188	INAMHI	3150	817847.0	9959606.0
98		M5022	FONAG	3620	817507.0	9964050.0
99		M5023	FONAG	3100	818242.0	9958152.0
100		M5024	FONAG	3637	812125.0	9958004.0
101		M5025	FONAG	3920	811859.0	9963068.0
102		P34	EPMAPS	3140	818480.0	9958251.0
103		P62	EPMAPS	4382	817868.7	9949872.0
104		P65	EPMAPS	4380	814132.0	9948675.0
105	PISQUE	M0009	INAMHI	2262	811632.9	9993360.2
106		M0023	INAMHI	3120	828654.0	10016386.5
107		M0111	INAMHI	2840	796964.8	10006147.3
108		M0344	INAMHI	3140	815346.6	9993667.4
109		M0359	INAMHI	2840	818441.5	10005963.8
110		M1094	INAMHI	2790	807981.6	10003688.7
111	PITA	C11	EPMAPS	3360	785139.7	9945104.9
112		M0364	INAMHI	3620	786461.5	9937886.6
113		M5026	FONAG	3670	784573.0	9937618.0
114		M5028	FONAG	3526	790439.0	9946524.0
115		M5029	FONAG	4100	796826.0	9944491.0
116		M5030	FONAG	3248	794173.0	9953712.0
117		M5076	FONAG	3866	789148.0	9931750.0
118		P35	EPMAPS	3360	785296.0	9945417.0
119		P39	EPMAPS	4040	793328.3	9926789.3
120		P54	EPMAPS	3340	793282.2	9949720.2
121	QUIJOS	P38	EPMAPS	4320	817489.0	9942660.0
122	SAN PEDRO	C08	EPMAPS	2750	787804.5	9956633.1
123		LOS CHILLOS	SA	2453	782728.0	9966808.0
124		M0003	INAMHI	3058	772701.4	9959435.0
125		M0113	INAMHI	2740	775454.7	9957037.2
126		M0118	INAMHI	2758	778271.2	9961277.4
127		M0120	INAMHI	3510	769195.4	9931041.1
128		M0353	INAMHI	2940	787643.4	9952700.0
129		M5027	FONAG	3727	760317.0	9936280.0

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 3.5:** Ubicación de los pluviómetros empleados para realizar la evaluación de la distribución espacio-temporal de la precipitación. (cont...)

No.	Subcuenca	Estación	Institución	Alt. (m)	Coord. UTM Zona 17 S	
					X (m)	Y (m)
130		M5077	FONAG	3983	757174.0	9930365.0
131	TAMBOYACU	C01	EPMAPS	3845	795679.0	9924698.8

ELABORADO POR: Christian Díaz

### 3.1.3 CONTROL DE CALIDAD

La calidad de la información establece la confianza de la evaluación de los productos satelitales. Para lo cual es fundamental generar una base de datos de alta confiabilidad; de manera que la evaluación sea muy acertada. En el caso de la información facilitada por la EPMAPS, que tiene datos de precipitación cada 5 min, requiere una validación previa, tomando en cuenta la frecuencia y duración de la lluvia, así como los informes mensuales realizados durante las visitas de mantenimiento. Parte del estudio comprende realizar la validación de esta información. La mayoría de la información está almacenada en equipos de la institución, el resto se descarga con una aplicación exclusiva de EPMAPS y una vez que se cuenta con la información se procede a realizar la validación de la información.

Esta validación comprendía unir todos los archivos crudos para los distintos años de cada estación pluviométrica, y una vez que se tiene un solo archivo en formato *.xls* se continúa con los siguientes pasos:

a) Revisar Duplicados

Se trata de eliminar los datos que se encuentran duplicados, que en su mayoría son errores del sensor de cada pluviómetro. Así como los errores, en donde se tiene distinta lectura para una misma fecha y hora.

b) Eliminar Negativos

Este caso se presenta por error del sensor (lectura negativa), que no debería suceder. También en el caso de encerrar el equipo durante las visitas mensuales.

c) Transformación Raw a Precipitación

La unidad de medida de los pluviómetros es RAW, luego se transforma a mm, multiplicando por su respectiva resolución, que depende de la marca de cada sensor utilizado por el pluviómetro. Hay que tomar en cuenta que se manejan resoluciones de los pluviómetros de 0.1, 0.2 y 0.24 mm por tip, que dependen de la marca del instrumento. Para ello, nos ayudamos también de los informes de mantenimiento, donde se encuentran observaciones e información importante para realizar la transformación.

$$Precipitación(mm) = RAW * resolución\_del\_pluviómetro \quad (3.1)$$

**TABLA 3.6:** Resolución temporal para distintos pluviómetros

Serie	Datalogger - Sensor	Resolución pluviómetro
20305	HOBO 542462	0.24 mm
154587	VX68111389	0.1 mm
198M00993	VX98111364	0.1 mm
154583	VX98111394	0.1 mm
154520	VX70111398	0.1 mm
020408EMXN	HOBO 531959	0.24 mm
542469	HOBO 542469	0.2 mm
TB06599	V2335069	0.1 mm

ELABORADO POR: Christian Díaz

## d) Revisión por años

Una vez que se ha completado la serie temporal se procede a separarla por años, de modo que se realiza el control visual de las series, donde se elimina información inconsistente, es decir se identifican problemas por taponamiento del pluviómetro o falla del sensor. Además se consideran, los anuarios que tienen observaciones que se hallaron durante las visitas mensuales a la estación. Al final, se vuelve a unir todos los archivos anuales y se obtiene una serie temporal de calidad controlada para cada estación.

**3.1.4 AGREGACIÓN A NIVEL MENSUAL**

La información recopilada de pluviómetros a distintas resoluciones temporales (5min, 1 hora, 1 día) se acumula a nivel mensual para todas las estaciones de EPMAPS, INAMHI, FONAG, IMHEA y SA mediante la utilización del software R Studio y se guarda en un archivo de formato *.RData*.

**3.1.5 HOMOGENIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Las series de observaciones climatológicas son de mucha importancia para el monitoreo del clima, dentro del actual contexto de preocupación por el cambio climático y sus impactos sobre las actividades humanas. El problema se debe a que existen registros "contaminados" por diversos efectos durante la toma de datos, que pueden alterar las series climáticas y enmascarar la verdadera evolución del clima. Por tanto, la homogeneización de series climáticas intenta separar la señal propiamente climática de lo que no lo es, para lo cual se aplican métodos estadísticos de homogeneización para eliminar las perturbaciones. Cuando analizamos una serie temporal de datos larga obtenida partir de un instrumento medidor o sensor es necesario analizar, qué parte de señal corresponde al clima y qué parte puede ser debido a distintas causas.

Entre los factores que alteran los datos se pueden presentar: modificaciones en el entorno de la estación, cambios en la ubicación de la estación, cambios en los procedimientos de medida, rotura del aparato de medición y cambios en el personal. Una serie es homogénea cuando sus variaciones responden exclusivamente a causas climáticas. Una serie es no homogénea cuando contiene saltos en la media de la serie motivados por causas no relacionadas con el clima.

### 3.1.5.1 Metodología para detectar series no homogéneas

Una serie no homogénea se detecta a partir del análisis de la estación meteorológica donde se informa de todas las incidencias que han afectado a la estación respecto a su ubicación o sus instrumentos. Se aplican técnicas matemáticas de detección de saltos en la media como por ejemplo el SNHT (Standard Normal Homogeneity Test). Este algoritmo analiza en cada punto de la serie la diferencia de las medias a ambos lados del punto dando un valor alto en el caso de encontrarse diferencias significativas. En general, se pueden producir dos tipos de alteraciones en la serie temporal: outliers y gaps.

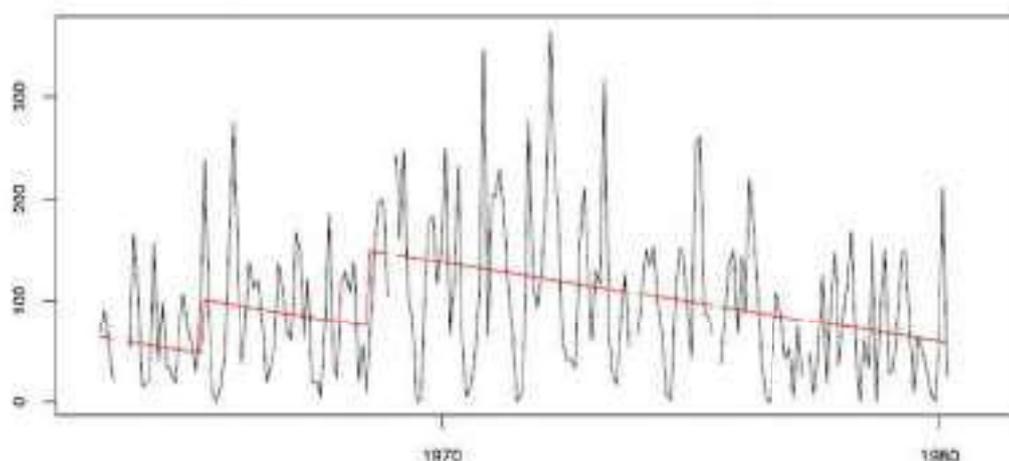
Los outliers son valores de la serie que superan un umbral lógico definido por la variabilidad de la propia serie. Existen dos tipos de outliers los sospechosos y los extremos. Los gaps o vacíos en la serie se consideran errores de registro y deben ser investigados. Los outliers se calculan para cada mes utilizando todos los datos mensuales de toda la serie temporal. En el caso de los outliers extremos y gaps, el procedimiento de estudio y corrección es idéntico que en el caso de los outliers sospechosos aunque en el caso de no encontrarse una serie contigua con una correlación mayor de 0.75 entonces el outlier extremo se elimina y el gap queda sin rellenar.

Las posibles causas que provocan outliers y gaps:

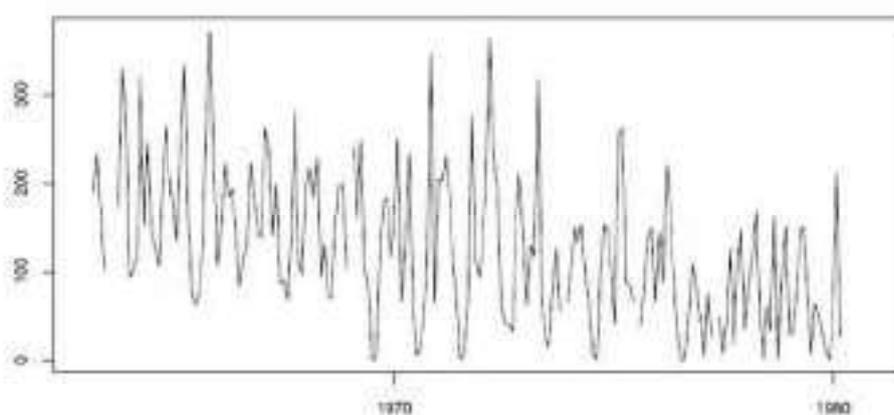
- Error en el aparato de medida. El aparato debe ser sustituido o reparado.
- Errores de lectura o transcripción de los datos por parte del colaborador.
- Indisponibilidad del colaborador durante un periodo de tiempo corto durante el que se suspende el registro de datos (gaps).
- Condiciones de tiempo extremas capaces de generar datos anómalos.

Por medio de los paquetes de programas "R" existen unos específicos para determinadas partes del procedimiento de homogeneización, como por ejemplo "RHtestV3" que detecta estos problemas y opcionalmente puede sustituir estos valores anómalos por los estimados. Además indica la relación de las correcciones realizadas y los niveles de significación de las pruebas de homogeneidad. Se verificó la homogeneidad con el paquete RHTestsV3 en los datos mensuales, ya que las series de tiempo diarias pueden ser muy ruidosas [Camposano et al., 2016].

En la Figura 3.3 se observa la serie temporal con las anomalías y en la Figura 3.4 la serie homogénea por medio del paquete RHTestV3.



**FIGURA 3.3:** Detección de discontinuidades en la serie de tiempo de anomalía de precipitación de la estación M009, con el paquete RHTest. Serie de tiempo original con control de calidad.  
Elaborado por Christian Díaz



**FIGURA 3.4:** Homogeneización de la serie de tiempo de la estación M009 con el paquete RHTest  
Elaborado por Christian Díaz

### 3.1.5.2 Análisis de doble masa

El análisis de doble masa analiza la homogeneidad de los datos de una estación. Su objetivo es determinar si en algún periodo hubo alguna anomalía. De manera gráfica se puede observar la relación que existe entre las variables climáticas de estaciones cercanas, para los periodos comunes de información. Mediante la curvas de doble masa se comprueba la proporcionalidad de los datos y evalúa variaciones que generen errores. También, son de gran utilidad para estudiar los periodos comunes de existencia de datos de las estaciones, con el fin de rellenar los vacíos. La representación gráfica para 2 pluviómetros cercanos debe tener como resultado una línea recta [Almeida, 2010, Monsalve, 1995].

Este método además de detectar heterogeneidades permite corregirlas. En caso de que se presente un cambio de pendiente, es necesario restablecer la homogeneidad bajo las condiciones del tramo más confiable. Éste puede ser: el último tramo que es el de la información más reciente (equipos más sofisticados y operarios más especializados) o el

tramo más consistente (el de mayor longitud). El ajuste se realiza al relacionar las pendientes como se indica en la Ecuación 3.2:

$$pcr = \frac{tcr}{tir} * pir \quad (3.2)$$

donde:

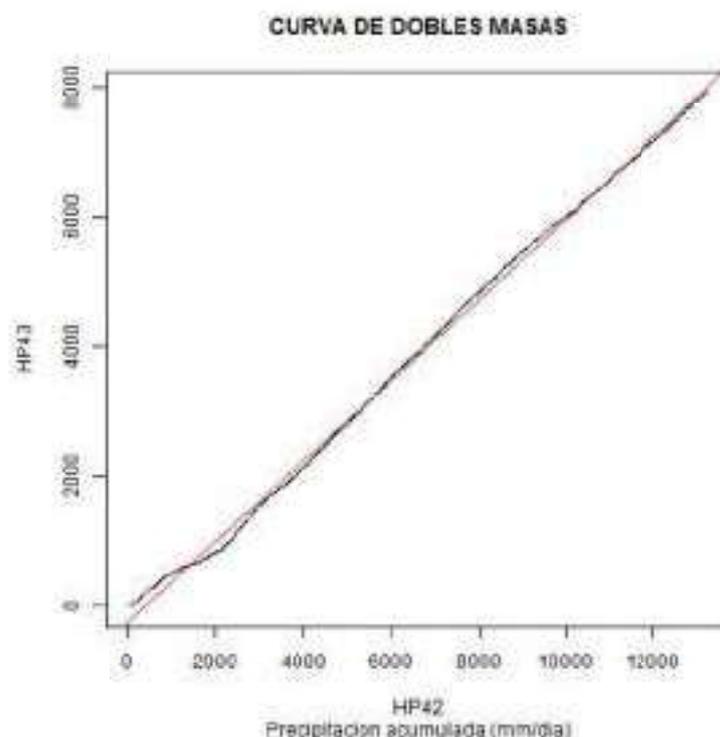
*pcr*: valor parcial corregido

*pir*: valor parcial incorrecto

*tcr*: pendiente del tramo correcto

*tir*: pendiente del tramo incorrecto

En los análisis temporales presentados previamente se puede observar qué estaciones se deben rellenar y los períodos en común con otras estaciones. Para realizar el análisis de doble masa se relacionaron las estaciones con la variable regional, donde *x* es la estación que representa a la región (independiente) y *y* es la estación dependiente. En función de los pares de estaciones se grafican las curvas de doble masa con los valores de precipitación acumulados (Figura 3.5) para períodos de tiempo coincidentes. Se evidencia que existe correlación entre dos estaciones pertenecientes a una misma subcuenca. De manera que se puede corregir las heterogeneidades detectadas.



**FIGURA 3.5:** Curva de doble masa P42 - P43  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### 3.1.6 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN - PORCENTAJE DE DATOS CON CONTROL DE CALIDAD

El resumen del porcentaje de vacíos de la información pluviométrica previa al proceso de relleno se expresa según el significado de los colores que consta en la Tabla 3.7:

**TABLA 3.7:** Significado colores

Color	Significado
	menor a 20 %
	entre 20 % y 40 %
	entre 40 % y 60 %
	entre 60 % y 80 %
	mayor a 80 %

ELABORADO POR: Christian Díaz

El color verde indica que una estación posee más del 80 % de la información mensual para un año de estudio, en contraste del color blanco donde se indica que la información mensual para un año es menor al 20 %.

## 3.2 MÉTODOS DE RELLENO Y SENSIBILIDAD

La continuidad en las series de precipitación facilita y optimiza considerablemente la validación de modelos hidrológicos. En los países en vías de desarrollo, como el nuestro, los vacíos en las series temporales de precipitación y demás variables climáticas son comunes e implican rigurosamente el empleo de los datos. A pesar de la existencia de métodos de relleno más sofisticados como métodos estocásticos o métodos de inteligencia artificial, se da preferencia a métodos determinísticos por su robustez, facilidad de ejecución, y eficiencia computacional [Campozano et al., 2015]. Constituye un proceso posterior al análisis de doble masa y utilización de la herramienta "RhTestV3" en la homogenización, una vez que se considera homogénea a la estación es confiable realizar el relleno .

Para el relleno se utilizará el método de regresión lineal simple y el método de regresión lineal múltiple según Campozano (2015), y debido a la falta de información para algunos períodos de importancia se optó por emplear métodos de relleno espaciales como: IDW, Kriging y Spline para completar y obtener una base de datos a nivel mensual para el período 1998-2016. Adicionalmente, se propone la utilización de precipitación satelital como una herramienta que permita complementar la información, es decir, realizar la regresión lineal en base a productos satelitales [Bedient et al., 2002].

### 3.2.1 MÉTODOS DE RELLENO TEMPORALES

#### 3.2.1.1 Método de Regresión Lineal Simple

Se aplica a pares de estaciones, en donde A tiene los datos completos y B no. También se puede establecer una estación A como una estación ficticia que corresponde a la variable regional. Se determina la relación que existe entre los valores mensuales, anuales o medios. Se determina el coeficiente de correlación ( $r$ ) que varía entre -1 y 1. Este coeficiente define el grado de asociación lineal o dependencia entre dos variables. Si la correlación es exactamente -1 o 1, quiere decir que es una asociación lineal perfecta entre dos variables. Esencialmente se admiten las series cuyo coeficiente de correlación sea  $r > 0.7$  [Kennedy et al., 1982]. Después de determinar el valor del coeficiente y decidir que es adecuado para explicar una relación lineal según la Ecuación 3.3:

$$y = a + bx \quad (3.3)$$

Entre sus ventajas es que permite rellenar medias de diferentes períodos y es utilizado para rellenar valores mensuales y anuales.

### 3.2.1.2 Método de Regresión Lineal Simple con Productos Satelitales

Se aplica de forma similar que la regresión lineal simple entre pares de estaciones, sólo que en lugar de una estación principal se usa el producto satelital para obtener la tendencia de la precipitación y rellenar la estación que tiene datos faltantes. Se determina la relación que existe entre los valores mensuales, anuales o medios.

$$y_p = a + bx_s \quad (3.4)$$

Donde  $y_p$  corresponde a la precipitación observada por la estación pluviométrica y  $x_s$  nuestra variable independiente correspondiente a la estimación de precipitación satelital.

### 3.2.1.3 Método de Regresión Lineal Múltiple

Se recomienda para estimación de datos mensuales y anuales de la estación en estudio, en base a datos pluviométricos consistentes de una estación cercana.

Se establece una correlación como esta:

$$Y = a + b * X1 + c * X2 + \dots + n * Xi \quad (3.5)$$

Donde:

$Y$ : valor de precipitación estimada

$Xi$ : valor de precipitación en estaciones con información completa

$a, b, c$ : constantes de regresión

Es más recomendable que el método de Regresión Lineal Simple, pero siempre que se cuente con estaciones cercanas y confiables. Constituye un proceso posterior al "análisis de doble masa".

## 3.2.2 MÉTODOS DE RELLENO ESPACIALES

### 3.2.2.1 IDW (Inverse Distance Weigthing)

El método de IDW tiene la capacidad de reproducir mediciones precisas y proveer información sin la interacción o interferencia del usuario. Además, este método ha demostrado eficiencia y credibilidad durante su uso en "The National Weather Service". Pero se debe considerar las limitaciones del equipamiento y de su operación. Las mediciones individuales de precipitaciones están sujetas a error de operación mecánica y dependen de la calibración. El método consiste en interpolar las estaciones que poseen información y luego rellenar el valor para las estaciones que carecen de datos.

La interpolación del punto problema se realiza asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa. La fórmula general es:

$$Z_j = \sum_{i=1}^n (k_{ij}Z_i) \quad (3.6)$$

Donde  $Z_j$  es el valor estimado para el punto  $j$ ;  $n$  es el número 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 y la suma total de ellos es la unidad.

Para establecer una función de proporcionalidad entre el peso y la distancia, la fórmula general queda como sigue:

$$Z_j = \frac{\sum \frac{Z_i}{(d_{ij})^\beta}}{\sum \frac{1}{(d_{ij})^\beta}} \quad (3.7)$$

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

Esta familia de métodos permite la generación de superficies o isoyetas de una forma rápida y simple. Sin embargo, se trata esencialmente de una media ponderada y, por tanto, el resultado se encuentra siempre incluido dentro del rango de variación de los datos. Por este motivo, el correcto tratamiento de las formas cóncavas y convexas depende estrechamente de la distribución de los puntos originales y la presencia de datos auxiliares se hace muy conveniente.

### 3.2.2.2 Kriging Ordinario

El método de Kriging es una técnica de estimación local que ofrece el mejor estimador lineal de una característica desconocida; en nuestro caso la precipitación. Se requiere el conocimiento del momento de segundo orden de la función aleatoria (covarianza o variograma) [Abad Encalada, 2014]. A partir de estimaciones de precipitación medida en ciertas localidades, es posible predecir el valor de dicha propiedad, en ubicaciones que carecen de muestreo o no existe información. El primer paso de este proceso de interpolación consiste en determinar la relación de dependencia entre los datos observados. Es decir, se analiza el semivariograma; sus conceptos generales, bondades y limitaciones. Predice los resultados como una combinación lineal de valores medidos cuyos pesos dependen de la correlación espacial entre ellos, la suma de los pesos es igual a uno. La premisa nos dice que la información de entrada no cambiará con el tiempo o espacio, por lo que la media y la varianza deben permanecer constantes en toda el área de estudio. Dicha suposición constituye la principal desventaja, debido a que la mayoría de fenómenos meteorológicos no son estacionarios intrínsecos.

Como ya se mencionó, se presume que la media del proceso es constante e invariante dentro del dominio espacial:

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (3.8)$$

Donde  $E$  representa la media,  $x$  y  $x+h$  pertenecen al dominio de los datos y  $h$  la distancia entre dos puntos. Además se asume también que la varianza de la diferencia entre dos valores está en función únicamente de la distancia  $h$  entre los dos puntos mas no de su ubicación espacial  $x$ :

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (3.9)$$

Donde  $\gamma(h)$  es el semivariograma. Finalmente, el predictor para el método de Kriging Ordinario se expresa:

$$\gamma(h, \alpha) = \frac{1}{2N(h, \alpha)} * \sum_{i=1}^N (h) ([Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2) \quad (3.10)$$

Donde:  $\gamma(h, \alpha)$ : Semivarianza como una función de la magnitud de la distancia entre puntos o vector de separación  $h$  y su dirección  $\alpha$ .

$N(h, \alpha)$ : Número de pares de observación separado por la distancia  $h$  y su dirección  $\alpha$ .

$Z(x_i)$ : Variable aleatoria en la posición espacial  $x_i$ .

### Variograma y Semivariograma

El variograma o semivariograma constituye una herramienta que permite estudiar el comportamiento espacial de una variable en un área definida, donde se obtiene como resultado un variograma experimental que refleja la distancia máxima y la forma en que un punto tiene influencia sobre otro punto a diferentes distancias.

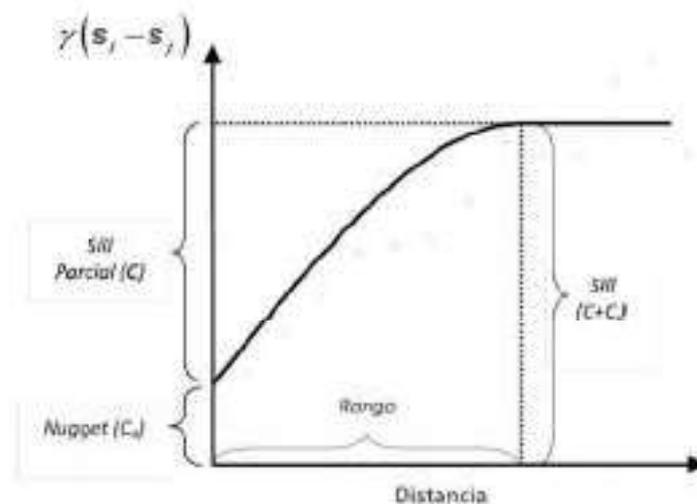
El semivariograma es el valor promedio de la diferencia al cuadrado de los valores de la propiedad en dos puntos separados por una distancia  $|h|$ . No depende de la localización, pero depende del módulo y la dirección del vector  $h$ .

La función  $\gamma(h)$  llamada semivariograma, cumple con las siguientes tres propiedades:

- Si es evaluado en el origen, siempre es positivo o cero  $\gamma(h) \geq 0$ .
- Es una función par  $\gamma(h) = \gamma(-h)$ .
- El variograma aumenta más lentamente que  $\|h\|^2$ .

$$\lim_{\|h\| \rightarrow \infty} \left( \frac{\gamma(h)}{\|h\|^2} \right) = 0$$

En la Figura 3.6 se muestra un variograma y sus elementos principales. El sill o meseta es el valor que acota en la parte superior al variograma; el rango es el valor de  $\|h\|$ , a partir del cual el valor del variograma es constante e igual a la meseta. Teóricamente,  $\gamma(h) = 0$ ; sin embargo, en la práctica suele suceder que  $\lim_{\|h\| \rightarrow 0} \{\gamma(h)\} \neq 0$ . A esta desigualdad se la conoce con el nombre de efecto *nugget* o pepita, y que es producida por las variaciones espaciales a distancias menores que el intervalo de muestreo más pequeño. La diferencia entre la meseta y la pepita se denomina sill parcial (psill) o meseta parcial.



**FIGURA 3.6:** Elementos del Semivariograma  
FUENTE:

[https://www.researchgate.net/profile/Mariano\\_Ordozola/publication/287995990/Semivariograma.png](https://www.researchgate.net/profile/Mariano_Ordozola/publication/287995990/Semivariograma.png)

Para conocer la estructura de autocorrelación para cualquier posible distancia entre sitios del área de estudio, es indispensable ajustar el semivariograma experimental a partir de modelos que generalizan lo observado en el semivariograma experimental a cualquier distancia.

Existe una gran variedad de modelos teóricos de semivarianza que pueden ajustarse al semivariograma experimental, en general encontramos a los no acotados: lineal, logarítmico, potencial y a los acotados: esférico (Sph), exponencial (Exp), gaussiano (Gau). Los modelos teóricos acotados descritos en Abad (2014) garantizan que la covarianza de los incrementos es finita, por lo que son los más utilizados y por este motivo se empleará para este estudio.

El desarrollo del proceso de interpolación Kriging fue realizado con la ayuda del software libre R, empleado en análisis geoestadísticos. Las ecuaciones empleadas y aplicaciones del modelo de semivariograma son los desarrollados por Buytaert et al. (2006). Dentro de la gran variedad de paquetes y librerías, encontramos a los modelos teóricos disponibles para su uso, además de los descritos anteriormente. Con la herramienta "autoKrige.cv" es posible automatizar el procedimiento de evaluación de los semivariogramas, ya que determina el modelo que más se ajusta a los datos.

### 3.2.2.3 Spline Line

Spline utiliza un método de interpolación que estima los valores empleando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie "suave" que pasa exactamente por los puntos de entrada. Conceptualmente, se ajusta una función matemática a una cantidad determinada de puntos de entrada más cercanos mientras pasa a través de los puntos de muestra. Este método es mejor para generar superficies que varían levemente, como la elevación o las concentraciones de contaminación.

La forma básica de la curvatura mínima de interpolación impone las siguientes dos condiciones:

- La superficie debe pasar exactamente por los puntos de datos.

- La superficie debe tener una curvatura mínima. La suma acumulada de los cuadrados de los términos de la derivada segunda de la superficie tomada sobre cada punto de la superficie debe ser un mínimo.

El algoritmo que utiliza la herramienta Spline se basa en la siguiente fórmula para la interpolación de la superficie:

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N (\lambda_j R(r_j)) \quad (3.11)$$

donde:

$j = 1, 2, \dots, N$ .

$N$  es el número de puntos.

$\lambda_j$  son coeficientes hallados mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales.

$r_j$  es la distancia desde el punto  $(x, y)$  al punto  $j$ .

$T(x, y)$  y  $R(r)$  se definen de forma diferente, dependiendo de la derivada segunda de la superficie interpolada.

La técnica de curvatura mínima asegura una superficie suave (continua y diferenciable), junto con superficies continuas. Luego, de haber realizado la interpolación se obtienen los datos para el relleno de las estaciones que carecen de información.

### 3.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y GENERACIÓN DE ISOYETAS

Los gráficos de las series temporales e isoyetas permiten analizar la sensibilidad de los métodos de relleno. Las isoyetas no son más que líneas que unen los puntos de igual cantidad de precipitación. Así, para una misma zona, se puede trazar un gran número de planos con isoyetas; como ejemplos, las isoyetas de la precipitación media mensual o las isoyetas de precipitaciones anuales. Los métodos de isoyetas que se emplearán son IDW, Kriging, entre otros, dependiendo de la disponibilidad de los datos [Campozano et al., 2015].

El trazado de las isoyetas se puede realizar a las observaciones de las estaciones pluviométricas o para las estimaciones satelitales. En el caso de las estimaciones de precipitación satelital se toman en cuenta el punto medio de cada pixel de las imágenes. Para cada método de relleno se realiza el proceso de interpolación IDW y Kriging para obtener los mapas de precipitación media interanual mensual. La generación de los mapas de isoyetas para productos satelitales se realizará con RStudio y el script que detalla la ejecución del mismo consta en el Anexo 6.4 .

### 3.2.4 MÉTRICAS ESTADÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RELLENO

En esta sección se refiere a realizar una análisis de las bases rellenas para determinar el método de relleno con resultados favorables para emplearlos en la fusión con productos satelitales y que representen la climatología de la zona de estudio. Para la evaluación del rendimiento de los 7 métodos de relleno se muestrearon los datos de la serie de tiempo (1998-2016), simulando una validación cruzada y se consideraron para una comparación adicional con los valores de relleno [Campozano et al., 2015] . La comparación entre estos valores se cuantificó mediante el error medio ( $ME$ ), el error absoluto medio absoluto ( $MAE$ ) y raíz del error medio ( $RMSE$ ). Las tres métricas de error (Ecuaciones 3.12,

3.13, 3.14 y 3.15) se valoraron para cada estación y en promedio para cada método de relleno.

$$ME_k = \frac{\sum_{i=1}^n (Rell_{ki} - Obs_i)}{n} \quad (3.12)$$

$$MAE_k = \frac{\sum_{i=1}^n |Rell_{ki} - Obs_i|}{n} \quad (3.13)$$

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Rell_{ki} - Obs_i)^2} \quad (3.14)$$

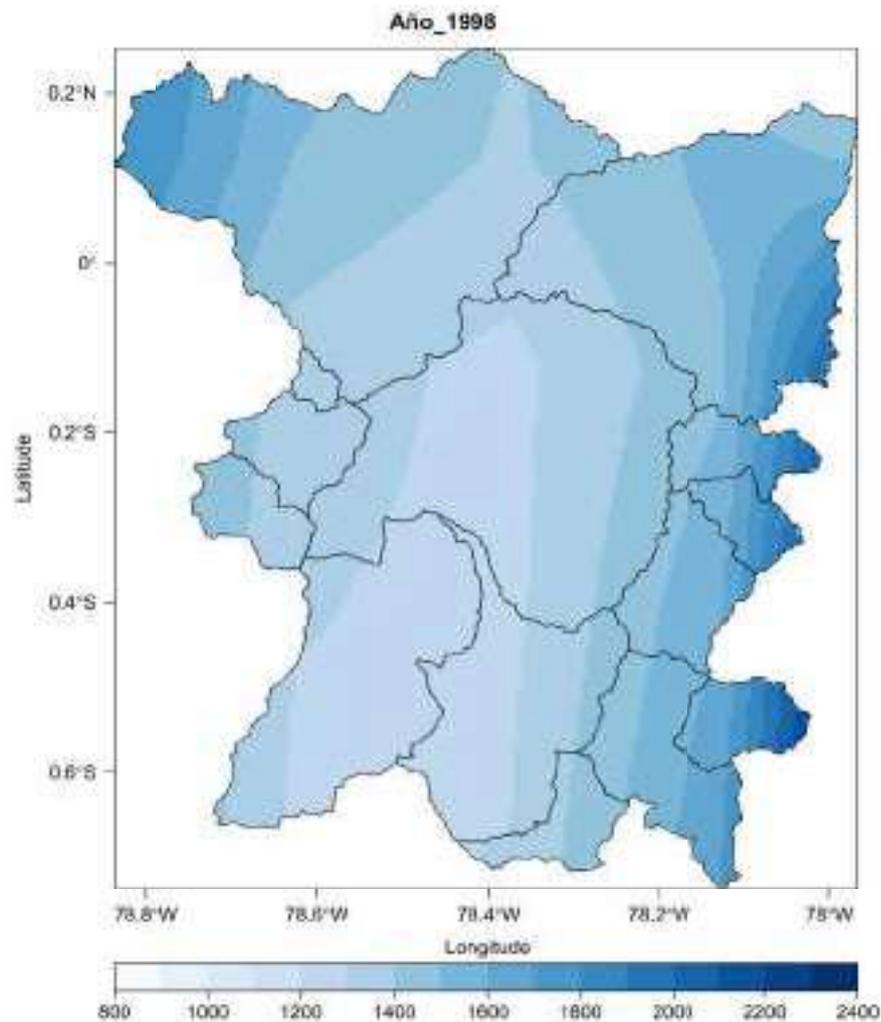
$$r_k = \frac{cov(Rell, Obs)}{\sqrt{var(Rell)} * \sqrt{var(Obs)}} \quad (3.15)$$

En estas ecuaciones se encuentran el error medio, el error medio absoluto, el error cuadrático medio y correlación de Pearson, respectivamente, para cada uno de los 7 métodos de relleno ( $k$  varía de 1 a 7).  $Rell_{ki}$  es el valor completado del método  $k$ ,  $n$  es el número de valores muestreados que no consideran vacíos, y  $Obs_i$  es el valor observado correspondiente al valor  $i$ . El método de relleno más óptimo es aquel que produce los errores mínimos y correlación más alta.

### 3.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL

El análisis es de tipo puntual, a la ubicación de los pluviómetros le corresponde su respectivo pixel en las imágenes satelitales. Si hay varios puntos dentro de un mismo pixel, el análisis se hace de manera independiente. Se realiza un análisis espacio-temporal comparativo de series de precipitación observadas y de productos satelitales a nivel mensual [Ochoa et al., 2014]. Se divide en 2: métodos de análisis estadístico cuantitativos  $r$  (Correlation Coefficient),  $d$  (Concordance Index), MAE (Mean Absolute Error), ME (Mean Error), RMSE (Root-Mean-Square Error), PBIAS [Tang et al., 2016, Tan et al., 2016] y cualitativos ETS (Equitable Threat Score), FBI (Frequency Bias Index), POD (Probability of Detection), FAR (False Alarm Ratio) considerando que las escalas de evaluación serían  $0.1^\circ$  y  $0.25^\circ$  a nivel mensual [Duan et al., 2015, Manz et al., 2017]. Este análisis es importante para demostrar la validez y realizar la evaluación de producto satelital, pues en un inicio se muestra como en la Figura 3.7.

La evaluación de la estructura espacial se realiza de dos maneras: a través del análisis de correlación de las estaciones y los productos satelitales, en función de la distancia, lo que se conoce con el nombre de "correlograma" y por medio del semivariograma (varianza vs distancia). La corrección de los productos satelitales, se realiza mediante la aplicación de varias técnicas que han demostrado tener buena correlación en la zona interandina [Manz et al., 2017]. Posteriormente se procede a la elaboración de mapas de precipitación de medias mensuales multianuales ( $mm$ ).



**FIGURA 3.7:** TMPA sin corregir Año 1998  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### 3.3.1 EVALUACIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES

La evaluación es de tipo puntual, a la ubicación de los pluviómetros le corresponde su respectivo pixel en las imágenes satelitales. Los métodos estadísticos se obtuvieron de estudios similares [Ochoa et al., 2014, Tan et al., 2016, Tang et al., 2016, Castro et al., 2015, Scheel et al., 2011, Feidas, 2010]. La comparación de ambos ayuda a la comprensión de los datos y conocer si el satélite es capaz de representar de forma cuantitativa y cualitativa la precipitación en los pluviómetros seleccionados para el estudio.

En primer lugar, están las métricas estadísticas: error medio (ME), porcentaje Bias (PBIAS), error medio absoluto (MAE), raíz del error medio cuadrado (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) e índice de concordancia ( $d$ ). Después los índices de detección: probabilidad de detección (POD), frecuencia de sesgo (FBI), falsa alarma (FAR) y probabilidad de detección corregida (ETS). Para presentar en forma más resumida los valores calculados para los índices de detección se presenta el resumen en dos grupos:

- Índices de detección con métodos de relleno temporales: Regresión Lineal Simple, Regresión Lineal Múltiple y Regresión Lineal Simple con productos satelitales (TMPA

v7 e IMERG v3).

- Índices de detección con métodos de relleno espaciales: IDW, Kriging y Spline.

### 3.3.1.1 Métricas Estadísticas

Varias medidas estadísticas ampliamente manejadas se utilizaron en este estudio para determinar cuantitativamente el rendimiento de los productos satelitales. Las medidas aplicadas para demostrar el error y el sesgo, entre las observaciones y las estimaciones de precipitación incluyen el sesgo relativo y raíz del error medio cuadrado. Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson e índice de concordancia para evaluar el acierto entre las observaciones de campo y los productos satelitales.

- Percent Bias (PBIAS %): Valora la diferencia media entre las estimaciones del producto satelital ( $P_s$ ) y la observada por los pluviómetros ( $P_p$ ), siendo  $n$  el número de pluviómetros. El sesgo relativo puede ser positivo o negativo. Un sesgo negativo indica una subestimación de precipitación del satélite, mientras que un sesgo positivo indica sobreestimación [Cabrera Atencia, 2016].

$$PBias \% = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{s_{xi}} - P_{p_{xi}})}{\sum_{i=1}^n (P_{p_{xi}})} * 100 \quad (3.16)$$

- Error Medio ( $ME$ ): Valora la diferencia media entre las estimaciones del producto satelital ( $P_s$ ) y la observada por los pluviómetros ( $P_p$ ), siendo  $n$  el número de pluviómetros. El error medio puede ser positivo o negativo. Un sesgo negativo indica una subestimación de precipitación del satélite, mientras que un sesgo positivo indica sobreestimación. Es el promedio entre los valores estimados por el satélite y los observados [Cabrera Atencia, 2016].

$$ME = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (P_{s_{xi}} - P_{p_{xi}}) \quad (3.17)$$

- Error medio absoluto ( $MAE$ ): Se toma el valor absoluto de los errores y los promedios durante toda la serie de tiempo considerada, para los  $n$  pluviómetros. Toma el valor absoluto de la Ecuación 3.18.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_{s_{xi}} - P_{p_{xi}}|}{n} \quad (3.18)$$

- Raíz del error medio al cuadrado:  $RMSE$  (por sus siglas en inglés "Root Mean Square Error") evalúa la magnitud típica del error de las estimaciones del satélite con las de los pluviómetros con sensibilidad a los errores más grandes y así también a valores atípicos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (P_{s_{xi}} - P_{p_{xi}})^2} \quad (3.19)$$

- Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ): Calcula el nivel de concordancia lineal entre las estimaciones y los pluviómetros. El valor del coeficiente es tal que  $-1 \leq r \leq 1$ . Un valor de  $r = 1$  indica correlación positiva perfecta. Si no existe correlación lineal o hay una correlación lineal débil ( $r$ ) es cercano a cero.

$$r = \frac{\text{cov}(P_s, P_p)}{\sqrt{\text{var}(P_s)} \times \sqrt{\text{var}(P_p)}} \quad (3.20)$$

- Índice de concordancia ( $d$ ): refleja el grado en el cual las observaciones de los pluviómetros son estimadas en forma correcta por las estimaciones del satélite. No es una medida de correlación como tal sino una medida del grado en el cual las estimaciones satelitales están libres de errores. La ventaja del índice de concordancia es que los errores y diferencias se les da su ponderación adecuada. El índice de concordancia varía de 0 a 1 con los valores más altos indican una mejor estimación del satélite [Cabrera Atienza, 2016].

$$d = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (P_{s_{xi}} - P_{p_{xi}})^2}{\sum_{n=1}^{\infty} (|P_{s_{xi}} - \bar{P}_p| + |P_{p_{xi}} - \bar{P}_p|)^2} \quad (3.21)$$

### 3.3.1.2 Índices de Detección

Otra técnica de evaluación de la estimación por satélite es la que utiliza tablas de contingencia, la cual es una matriz de dos dimensiones en que cada elemento cuenta el número de ocurrencias en la que las observaciones de los pluviómetros y las correspondientes estimaciones satelitales detectaron precipitación superior al umbral dado. Las posibilidades son:

- El satélite detecta precipitación y el pluviómetro también (Éxito).
- El satélite detecta precipitación, pero el pluviómetro no (Falsa alarma).
- El satélite no detecta la precipitación, pero el pluviómetro sí (Error).
- El satélite no detecta la precipitación, el pluviómetro tampoco (Correcto negativo).

En la Tabla 3.8 se definen los elementos de las tablas de contingencia, utilizados para evaluar la ocurrencia de precipitación captada por el producto satelital.

**TABLA 3.8:** Tabla de contingencia

		Satélite		Total
		SI	NO	
Pluviómetro	SI	Éxitos (a)	Errores (c)	a + c
	NO	Falsas Alarmas (b)	Correcto negativo (d)	b + d
	Total	a+b	c+d	Total

ELABORADO POR: Christian Díaz

Se realizó un análisis de detección de eventos de precipitación mediante las tablas de contingencia y los índices: probabilidad de detección ( $POD$ ), probabilidad de detección corregido

(*ETS*), falsa alarma (*FAR*) y sesgo (*FBI*) para diferentes umbrales de precipitación (5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm), y para cada pluviómetro.

Entonces:

- Probabilidad de detección: *POD* (por sus siglas en inglés "Probability Of Detection") es definida como la fracción de precipitación que fue pronosticada adecuadamente. Si el valor de *POD* es cercano a 1, indica una mejor detección realizada por el satélite, *POD*=1 indica una estimación perfecta [Cabrera Atiencia, 2016].

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (3.22)$$

- Probabilidad de detección corregida: *ETS* (por sus siglas en inglés "Equitable Threat Score") es la fracción de precipitación que fue adecuadamente detectada, ajustada por el número de detecciones (*He*) que se espera que ocurran sólo por azar, como en la Ecuación 3.23

$$ETS = \frac{a - He}{a + b + c - He} \quad (3.23)$$

$$He = \frac{(a+c)(a+b)}{n} \quad (3.24)$$

Donde *n* es el número total de valores estimados. Una detección perfecta del satélite da un resultado de *ETS* de 1 [Cabrera Atiencia, 2016].

- Falsa alarma: *FAR* (por sus siglas en inglés "False Alarm Rate") se define como la fracción de precipitación que en realidad no ocurrió; es decir, que había detectado el satélite pero no los pluviómetros.

$$FAR = \frac{(a+c)(a+b)}{n} \quad (3.25)$$

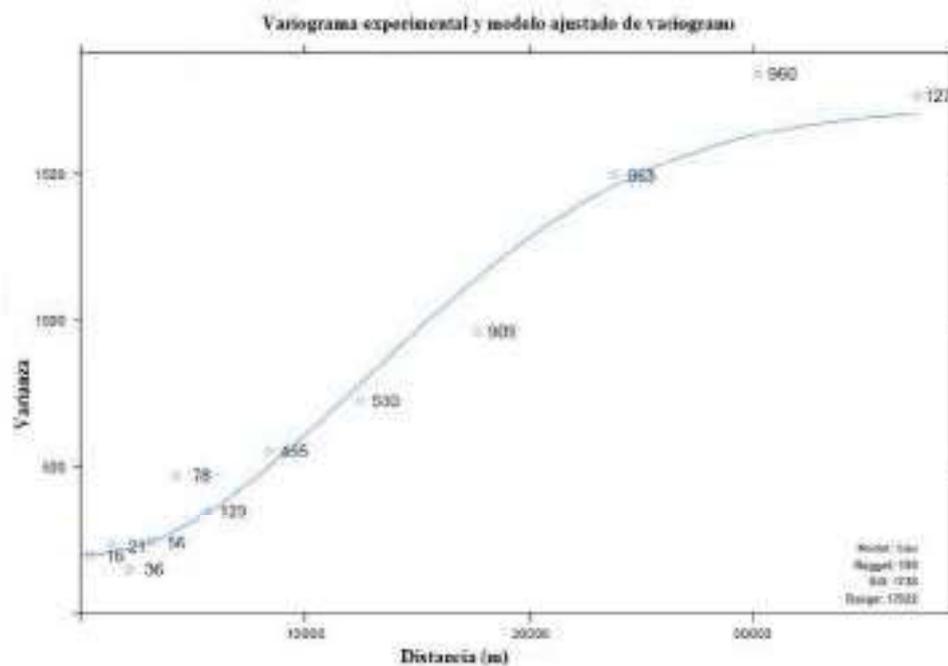
El índice varía entre 0 y 1. *FAR* tiene una connotación negativa, mientras más cercano a 0 sea su valor indica un mejor pronóstico. El valor perfecto es 0, pues indica que el satélite no emitió falsas alarmas.

- Frecuencia de sesgo: *FBI* (por sus siglas en inglés "Frequency Bias Index") es la proporción de la cantidad de eventos de precipitación detectados por el satélite respecto a la cantidad detectados por los pluviómetros [Cabrera Atiencia, 2016]. Entonces, su rango es de 0 a  $\infty$ . El valor perfecto del índice es 1.

$$FBI = \frac{a+b}{a+c} \quad (3.26)$$

### 3.3.2 ESTRUCTURA ESPACIAL

Se realizará el análisis de la estructura espacial de la precipitación, a través del semivariograma (Varianza vs Distancia) (Figura 3.8) y el análisis de un correlograma (Correlación vs Distancia) para las observaciones de los pluviómetros y de los productos satelitales. En vista de que se cuenta con 2 productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 con  $0,25^\circ$  y  $0,1^\circ$  respectivamente, es necesario determinar la estructura espacial de la precipitación que es capturada de mejor manera que los pluviómetros. Sin embargo, la existencia de más de un pluviómetro por pixel nos permite realizar la corrección adecuada.



**FIGURA 3.8:** Ejemplo de Semivariograma para el análisis de estructura espacial  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En general, el correlograma (Ecuación 3.27) se utiliza para representar el desfaseamiento en series de tiempo, pero cuando se estima en forma bivariada representa la variabilidad espacial [Manz et al., 2017].

$$\rho(h) = \frac{\text{cov}(Z(x), Z(x+h))}{\sqrt{\text{var}Z(x) * \text{var}Z(x+h)}} \quad (3.27)$$

donde:

$h$  es un incremento en el espacio de dos dimensiones para los puntos

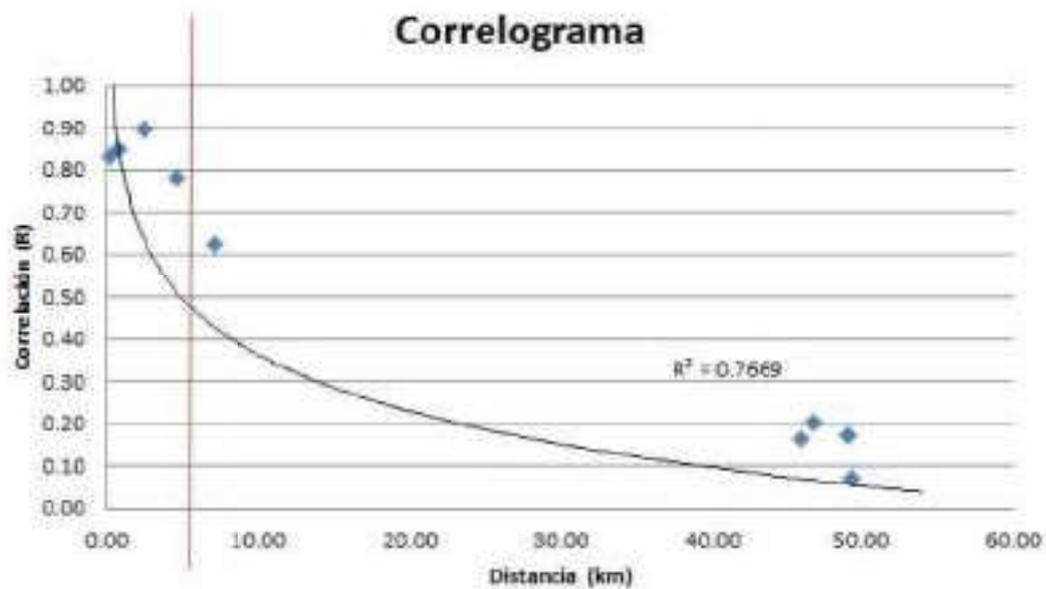
$Z(x_i)$  es una variable aleatoria donde  $x_i$  es el vector de mediciones en el punto  $i$

**TABLA 3.9:** Matriz de Correlación - Distancia para las estaciones pluviométricas en la zona de estudio

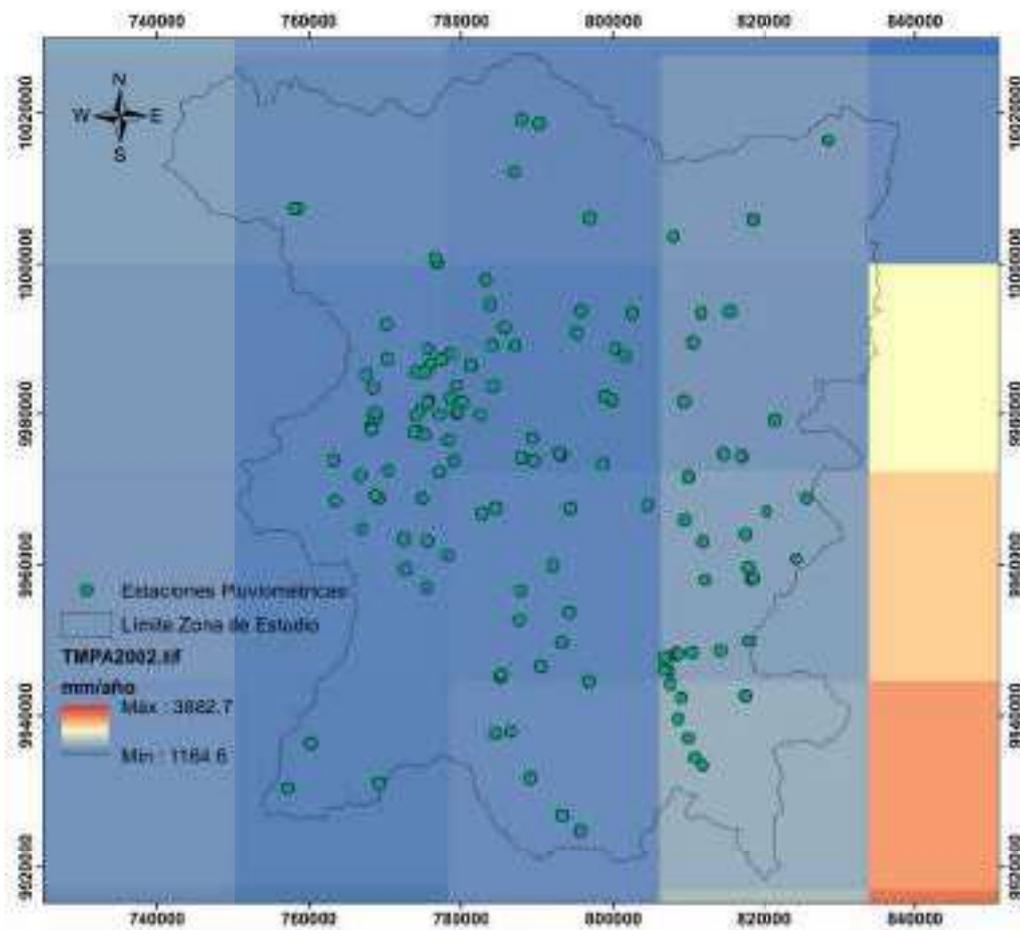
	Est1	Est2	Est3	...	...	...	Est n
Est 1	-	d12	d13	...	...	...	d1n
Est 2	r12	-	d23	...	...	...	d2n
Est 3	r13	r23	-	...	...	...	d3n
...	...	...	...	-	...	...	...
...	...	...	...	...	-	...	...
Est n	r1n	r2n	r3n	...	...	...	-

ELABORADO POR: Christian Díaz

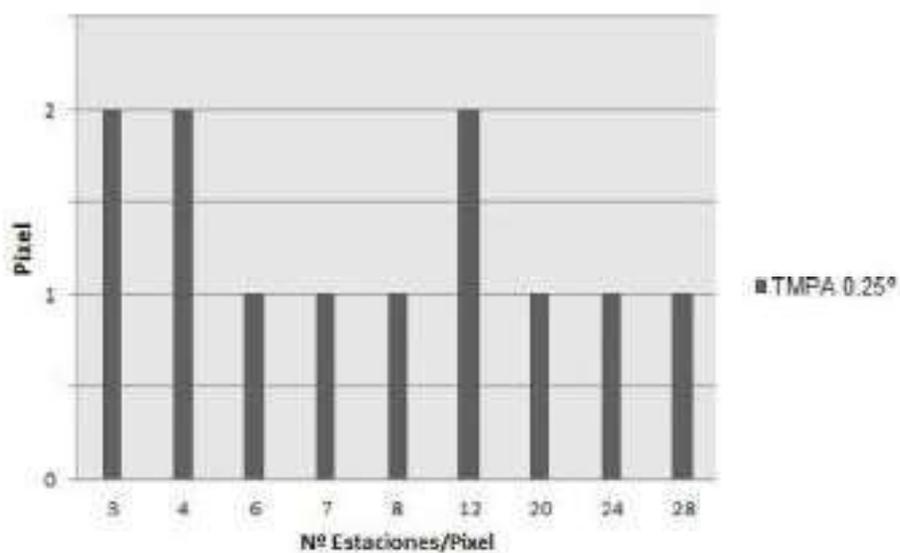
En la Tabla 3.9, los valores en color azul representan los coeficientes de correlación  $r$ , mientras que los valores en rojo representan la distancia en  $km$  entre estaciones. Para determinar un criterio de selección de la distancia en que la correlación entre estaciones es aceptable (mayor a 0.7), es necesario presentar la matriz gráficamente (Figura 3.9), donde se visualiza que, para distancias menores a 5  $km$  aproximadamente la correlación es aceptable.

**FIGURA 3.9:** Matriz de correlación gráfica  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 3.10 y Figura 3.11, se muestra la cantidad de estaciones por pixel para la resolución  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  de TMPA. Un pixel de TMPA puede contener hasta 28 estaciones pluviométricas.

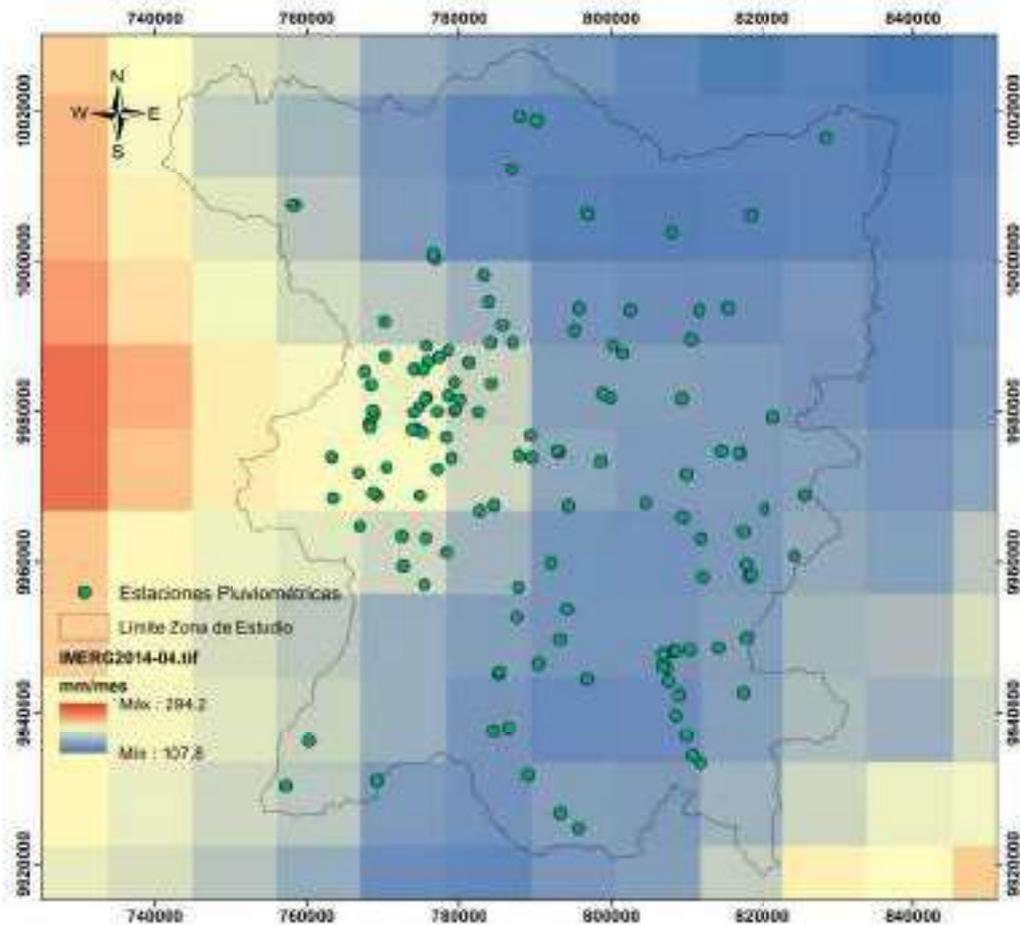


**FIGURA 3.10:** Producto Satelital TMPA 3B43 v7 para el año 2002  
Elaborado por Christian Díaz

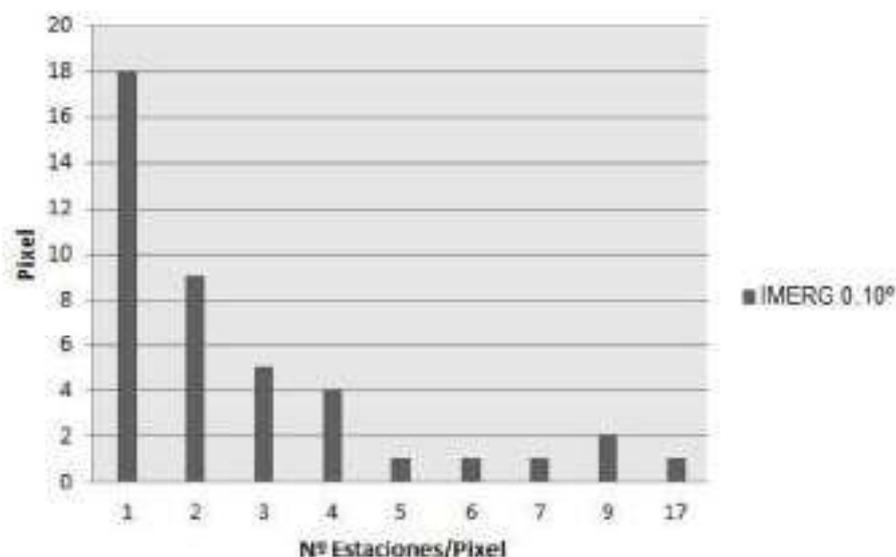


**FIGURA 3.11:** Número de estaciones por píxel  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$   
Elaborado por Christian Díaz

En la Figura 3.12 y Figura 3.13, se muestra la cantidad de estaciones por pixel para la resolución  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  que corresponde a IMERG.



**FIGURA 3.12:** Producto Satelital IMERG v3 para Abril 2014  
Elaborado por Christian Díaz



**FIGURA 3.13:** Número de estaciones por pixel  $0.10^\circ \times 0.10^\circ$   
Elaborado por Christian Díaz

Se observa claramente que con TMPA v7, un pixel tiene como mínimo 3 estaciones y como máximo 28 estaciones. En el caso de IMERG v3, debido a su resolución espacial, en 18 ocasiones un pixel tiene una estación por pixel y en una ocasión contiene hasta 17 estaciones.

### 3.3.3 FUSIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES

Se han desarrollado técnicas que comprueban la complementariedad entre la información pluviométrica y los satélites. Las estimaciones satelitales de precipitación pueden ser corregidas por sesgo con datos de precipitación provenientes de una red de pluviómetros confiable y en caso de que los productos satelitales hayan sido evaluados de manera confiable, estos resultados pueden ser utilizados en zonas donde no existan pluviómetros [Dinku et al., 2010].

Debido a las ventajas y desventajas de los productos satelitales se han desarrollado técnicas que usan gran precisión para estimar precipitación. También existen métodos estadísticos que combinan esta información con datos de campo provenientes de pluviómetros [Dinku et al., 2010]. En lo que respecta a las imágenes satelitales es importante conocer su resolución espacial y temporal, pues las estimaciones corresponden a la precipitación promedio sobre un área determinada y en un periodo de tiempo limitado.

#### 3.3.3.1 Métodos de Corrección

La corrección de valores de la precipitación TMPA v7 e IMERG v3, se realizarán empleando técnicas indicadas por [Nerini et al., 2015, Dinku et al., 2010]. Estos métodos propuestos han utilizado datos de precipitación observada a nivel de 1 hora y 3 horas, sin embargo, para el presente estudio se realizará a nivel mensual, pues se tienen series menos ruidosas y permitirán la realización de mapas de isoyetas mensuales multianuales. Se corregirá los productos TMPA e IMERG a nivel mensual mediante los métodos no paramétricos y geoestadísticos [Nerini et al., 2015]. Los métodos serán escogidos entre MBC (Mean Bias

Correction), DS (Double-Kernel Smoothing), BC (Bayesian Combination), KED (Kriging With External Drift), dependiendo de los datos obtenidos. Se generará las isoyetas en base a los productos corregidos a nivel de medias interanuales mensuales y nivel anual.

Este proceso de corrección se realizará con ayuda de "R Studio" que cuenta con una librería especializada para el desarrollo de cada método de corrección, llamada "Rainmerging". Esta herramienta se puede descargar de la dirección: <https://github.com/zedzulkaffi/Rainmerging>. Los métodos de corrección que se utilizaron de la librería fueron MBC, DS, KED y BC. Se generará isoyetas (mapas de superficie o grids) con datos de satélite TMPA v7 e IMERG v3 corregidos con los métodos de corrección seleccionados.

Para cada base de datos rellena se aplican los métodos de corrección que se describen a continuación:

### Mean Bias Correction (MBC)

Este método de corrección está basado en las estimaciones del producto satelital multiplicado por el sesgo total entre la precipitación observada por los pluviómetros y los valores que estima el satélite, de modo que se asume sesgo uniforme sobre el espacio. Para cada evento (espacio de tiempo), un factor de corrección  $B$  es calculado usando la Ecuación 3.28 [Nerini et al., 2015].

$$B = \frac{\sum_{j=1}^N ZG(x_j)}{\sum_{j=1}^N ZS(x_j)} \quad (3.28)$$

Donde  $N$  es el número total pluviómetros disponibles dentro del dominio del satélite,  $ZG(x_j)$  y  $ZS(x_j)$ , indican los valores de precipitación mensual de los pluviómetros y satélite correspondiente al pluviómetro localizado  $j$ .

### Double-Kernel Smoothing (DS)

Es una técnica no paramétrica que fue desarrollada para aplicaciones con escasez o ausencia de datos. Este método consiste en la interpolación de los puntos residuales,  $\varepsilon_{Sj}$ , empleando la función residual de kernel y el campo ajustado del satélite por sus residuales [Li and Shao, 2010]. Los residuales del pluviómetro  $j$  se determina por:

$$\varepsilon_{Sj} = \varepsilon_S(x_j) = Z_S(x_j) - Z_G(x_j) \quad (3.29)$$

La interpolación de primer nivel está desarrollada para generar un conjunto de residuos completos, llamados pseudo-residuos ( $\varepsilon_{SSi}$ ) en la misma grilla que se encuentran los datos del satélite.

$$\varepsilon_{SSi} = \frac{\sum_{j=1}^N \wedge(\|H_i - H_j\|/b) \varepsilon_{Sj}}{\sum_{j=1}^N \wedge(\|H_i - H_j\|/b)} \quad (3.30)$$

Donde  $\|H_i - H_j\|$  es la norma euclidiana y  $\wedge$  corresponde a la función de Kernel Gaussiano [Li and Shao, 2010].

$$\wedge(\|H_i - H_j\|/b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\|H_i - H_j\|/b)^2\right\} \quad (3.31)$$

Siendo  $H$  la posición de los puntos, donde el ancho de banda  $b$  se calcula usando la regla Silverman.

$$b = \left(\frac{4\sigma^5}{3n}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.32)$$

$n$  es el número de muestras y  $\sigma$  es la desviación estándar de las muestras. El segundo nivel de interpolación es aplicado a los residuos y pseudoresiduos.

$$\varepsilon_{DSk} = \frac{\sum_{j=1}^N \wedge(\|Hk - H_j\|/b_1)\varepsilon_{Sj} + \sum_{i=1}^M \wedge(\|Hk - H_i\|/b_2)\varepsilon_{SSj}}{\sum_{j=1}^N \wedge(\|Hk - H_j\|/b_1) + \sum_{i=1}^M \wedge(\|Hk - H_i\|/b_2)} \quad (3.33)$$

De modo que el producto combinado  $Z_{DSk}$  es calculado por:

$$Z_{DSk} = Z_{Sk} - \varepsilon_{DSk} \quad (3.34)$$

La interpolación (Suavización de Kernel) de los residuos no se basa en un supuesto estacionario como en el caso de métodos geoestadísticos. La fórmula es tal que el producto de interpolación converge hacia estimaciones de los pluviómetros con una menor distancia hacia las observaciones estimadas en tierra.

### Kriging With External Drift (KED)

Si la parte determinística de la variación (deriva) se define externamente como una función lineal de algunas variables auxiliares, en lugar de las coordenadas, se prefiere el término kriging con deriva externa (KED). En el caso de KED, las predicciones se hacen como con kriging, con la diferencia de que la matriz de covarianza de residuos se extiende con los predictores auxiliares. Sin embargo, la deriva y los residuos también se pueden estimar por separado y luego sumar [Nerini et al., 2015].

Aquí se supone que una variable adicional  $Y(u)$  que está relacionada linealmente con  $Z(u)$  existe. La suposición del valor constante esperado se reemplaza por:

$$E(Z(u)|Y(u)) = a + bY(u) \quad (3.35)$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes desconocidas. El estimador lineal de la Ecuación 3.36 debe ser imparcial para cualquier valor  $a$  y  $b$ .

$$Z(u) = \sum_{i=1}^n \beta_i Z(u_i) \quad (3.36)$$

Al minimizar la varianza de estimación bajo la suposición anterior conduce al siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\sum_{j=1}^I \beta_j \gamma(u_i - u_j) + \mu_1 + \mu_2 Y(u_i) = \gamma(u_i - u) \quad (3.37)$$

$$i = 1, \dots, I \quad (3.38)$$

$$\sum_{j=1}^I \beta_j = 1 \quad (3.39)$$

$$\sum_{j=1}^J \beta_j Y(u_j) = Y(u) \quad (3.40)$$

Donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  son multiplicadores de Lagrange. El variograma utilizado en la Ecuación 3.40 también se usa en Kriging Ordinario. Hay que tener en cuenta que la variable  $Y$  debe ser conocida en la ubicación  $x$ , para realizar una estimación. El estimador por lo tanto depende de la variable adicional  $Y(u)$ . KED es una alternativa para co-kriging y puede tomarse si la información secundaria  $Y(u)$  está disponible en una alta resolución espacial, preferiblemente una cuadrícula regular. Co-kriging requeriría la estimación de covariogramas.

Además, para el empleo de esta técnica hay que tomar en cuenta que es aplicable cuando los datos son normales. Para ello, se realiza gráficamente un histograma y curva de normalidad. Para evaluar el grado de ajuste se propone realizar un test sobre la normalidad de los residuos conocido como: Test de Kolmogorov-Smirnov. Donde se determina el valor de  $p$  para aceptar la hipótesis de normalidad [Steinskog et al., 2007]. El punto de corte que se suele utilizar es  $p = 0,05$ . Si esa  $p$  es mayor que 0,05, acepto la hipótesis nula, es decir: la distribución es normal. Si es menor que 0,05, rechazo la hipótesis nula y entonces la distribución no es normal. Adicionalmente se estima la asimetría de la distribución con lo que se puede afirmar o negar si una variable es normal o no; mientras más cercana a 0 tiene mayor simetría.

### Bayesian Combination (BC)

Esta función fusiona precipitación satelital y Kriging Ordinario. Usando la inferencia bayesiana condiciona las estimaciones de precipitación satelital a medidas de pluviómetro. La "inferencia bayesiana" es un tipo de inferencia estadística en donde las evidencias u observaciones se emplean para actualizar o inferir la probabilidad de que una hipótesis pueda ser cierta, en nuestro caso las estimaciones de precipitación satelital, según Ecuación 3.41. El desarrollo teórico es seguido por un ejemplo numérico, en el cual un campo de error con un gran sesgo y una varianza que se reduce sustancialmente en un campo aleatorio conocido. Por otra parte, estudios demuestran las mejoras en la distribución espacial de la lluvia que se puede obtener por medio de productos satelitales y constituyen una buena técnica de acondicionamiento [Nerini et al., 2015].

$$P(A_i) = \frac{P(B_i)P(A_i)}{\sum_{j=1}^N P(B_k)P(A_k)} \quad (3.41)$$

donde:  $A_i$ : precipitación estimada por el satélite.

$B$ : precipitación observada por el pluviómetro.

Esta fórmula nos permite calcular la probabilidad condicional  $P(A_i|B)$  de cualquiera de los eventos  $P(A_i)$ , dado  $B$ .

#### 3.3.3.2 Validación Cruzada

Para la evaluación de los datos obtenidos mediante las observaciones de campo y las correcciones de los productos satelitales, se emplea la validación cruzada. La validación cruzada "Crossval" consiste en simular la inexistencia de información pluviométrica. Es decir, se

quita una estación a la vez y se realiza interpolación con los datos de las estaciones sobrantes y así determinar los errores para cada punto eliminado. La librería de "automap" del software R dispone de la herramienta automatizada "autoKrige.cv", que realiza este proceso de evaluación. Este proceso incluye la determinación de algunas métricas estadísticas (MAE, ME, RMSE y  $r$ ) y definir el grado de confiabilidad de los métodos de corrección [Cabrera Atiencia, 2016]. Mediante el cálculo de éstas métricas es posible determinar que método produce los errores más significativos y la correlación más alta.

### 3.3.3.3 Generación de Isoyetas

El trazado de las isoyetas se realiza a las estimaciones satelitales corregidas por los distintos métodos de corrección. En el caso de las estimaciones de precipitación satelital se toman en cuenta el punto medio de cada pixel de las imágenes satelitales corregidas. Para cada producto satelital corregido se realiza el proceso de interpolación Kriging para obtener los mapas de precipitación media mensual multianual. La generación de los mapas de isoyetas para productos satelitales se realizará con RStudio y el script que detalla la ejecución del mismo consta en el Anexo 6.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados que cumplen con cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

#### 4.1 GENERACIÓN DE BASE DE DATOS

Para este proceso de generación, recopilación y procesamiento de datos se emplea el software "RStudio".

##### 4.1.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se considera la información de precipitación con datos de precipitación desde enero de 1998 hasta diciembre de 2016, es decir en total son 228 valores de precipitación para cada estación. A continuación, en la Tabla 4.1 se observa un ejemplo de la precipitación mensual de algunas estaciones correspondientes al período 1998-2016:

**TABLA 4.1:** Precipitación mensual de datos observados por las estaciones pluviométricas.

Mes	Año	M0002	M0010	M0024	P34	M0335	M0359	M1094	C11	M0364	C08
1	1998	77.2	NA	58.1	NA	77.6	NA	20.9	NA	103.5	NA
2	1998	51.5	NA	96.5	NA	202.6	46.3	68.1	NA	172	NA
3	1998	86.4	NA	127.5	NA	174.5	104.6	76.6	NA	177.5	NA
4	1998	53.4	NA	143.9	NA	271	140.9	73	NA	241.9	NA
5	1998	105.3	NA	193.9	NA	278	110.6	85.1	NA	194.2	NA
6	1998	15.2	19.6	14.5	NA	21.5	NA	14.7	NA	26.3	NA
7	1998	21.1	23.2	32.2	NA	43.9	28.4	28.8	NA	34.2	NA
8	1998	45.8	7.2	18.8	NA	49.5	3.6	4.9	NA	60.9	NA
9	1998	9.3	18.6	58.8	NA	120.8	2.7	22.1	NA	56.7	NA
1	1998	107.1	158	103.6	NA	150.9	94.9	55.7	NA	220.8	NA
11	1998	113.3	38	138.6	NA	103	63.2	61.8	NA	163.2	NA
12	1998	26.5	22.7	32.6	NA	111.8	25.9	35.4	NA	57.6	NA
1	1999	57.1	NA	81.6	NA	149.8	148.5	76.4	NA	193.4	NA
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	2016	NA	NA	2.1	58.5	NA	NA	NA	4.6	NA	7.1
9	2016	NA	NA	6.5	117.6	11.9	NA	NA	38.6	NA	34.7
1	2016	NA	NA	91.5	38.8	140.6	NA	NA	106.5	NA	109.4
11	2016	NA	NA	109.3	46.9	165.6	NA	NA	82.5	NA	36.7
12	2016	NA	NA	28.3	36.8	37.1	NA	NA	110.3	NA	114.4

ELABORADO POR: Christian Díaz

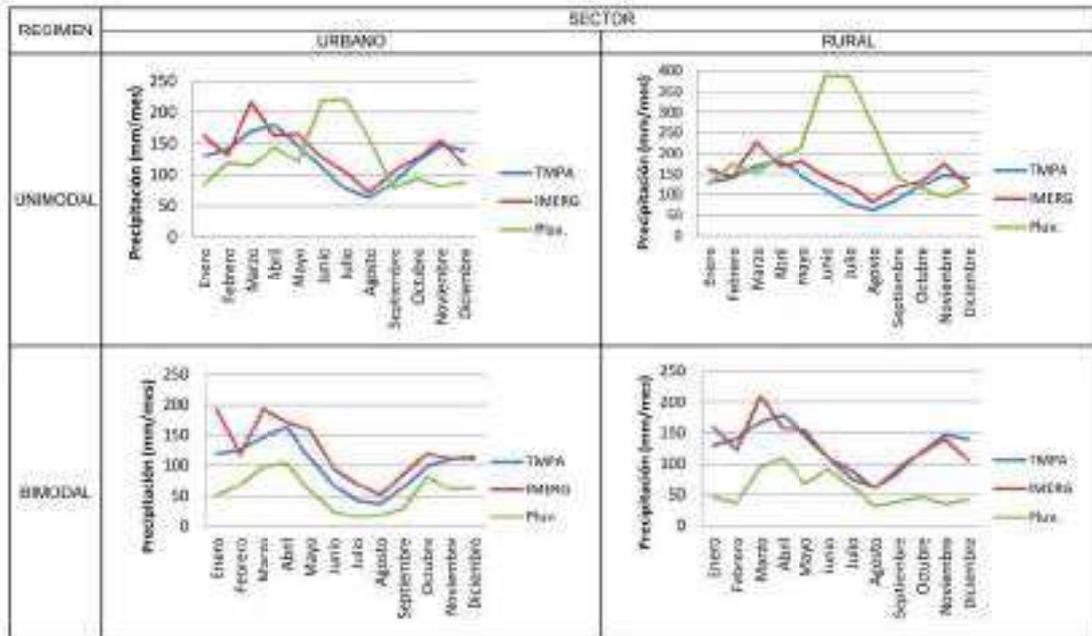
También se presenta la información de precipitación como media mensual multianual correspondiente al período (1998-2016), solo con 12 valores de precipitación para cada estación sin ningún tratamiento inicial. En la Tabla 4.2 se muestra la precipitación media mensual multianual de algunas estaciones.

**TABLA 4.2:** Precipitación media mensual multianual de datos observados por las estaciones pluviométricas.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C09	74.1	82.5	93.3	117.9	109.1	113.4	84.9	60.6	68.0	89.1	82.4	83.9
C10	84.2	85.2	114.7	120.2	108.4	115.3	82.7	62.4	67.5	94.8	89.8	88.2
P42	94.9	98.6	132.6	147.1	142.1	162.4	138.0	98.9	98.0	110.0	105.4	102.7
P43	85.5	80.2	114.1	115.7	117.9	116.6	86.8	62.0	70.5	86.6	90.3	85.1
P55	84.4	80.2	111.5	118.6	112.3	111.2	84.0	60.9	67.8	90.7	87.6	89.0
P44	93.2	110.0	142.8	154.5	168.5	210.6	172.2	117.3	111.5	102.0	86.8	100.4
P46	80.4	99.6	121.5	145.1	152.7	180.3	126.4	108.7	103.7	95.2	86.8	110.2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M0003	133.4	156.4	195.0	201.6	152.5	65.9	37.0	36.6	71.7	131.2	145.7	139.9
M0113	146.9	153.2	174.8	166.9	133.3	55.2	30.9	29.0	59.5	116.0	123.8	145.9
M0118	129.2	145.2	179.0	187.0	128.5	58.3	29.7	30.7	63.1	126.4	131.3	137.0
M0120	107.7	124.3	146.3	152.3	126.2	62.4	35.0	26.5	52.7	97.1	112.7	123.3
M0353	212.1	263.8	308.8	251.7	181.9	85.1	35.9	44.7	52.8	132.4	153.2	188.0
M5027	116.3	138.7	159.2	169.7	131.0	62.8	38.1	24.0	54.8	106.1	118.8	127.5
M5077	124.9	149.5	174.5	171.7	130.4	66.0	32.5	29.0	56.6	115.5	126.7	133.3
C01	98.5	100.8	118.6	122.7	121.0	99.6	59.0	58.4	72.5	96.7	97.5	103.0

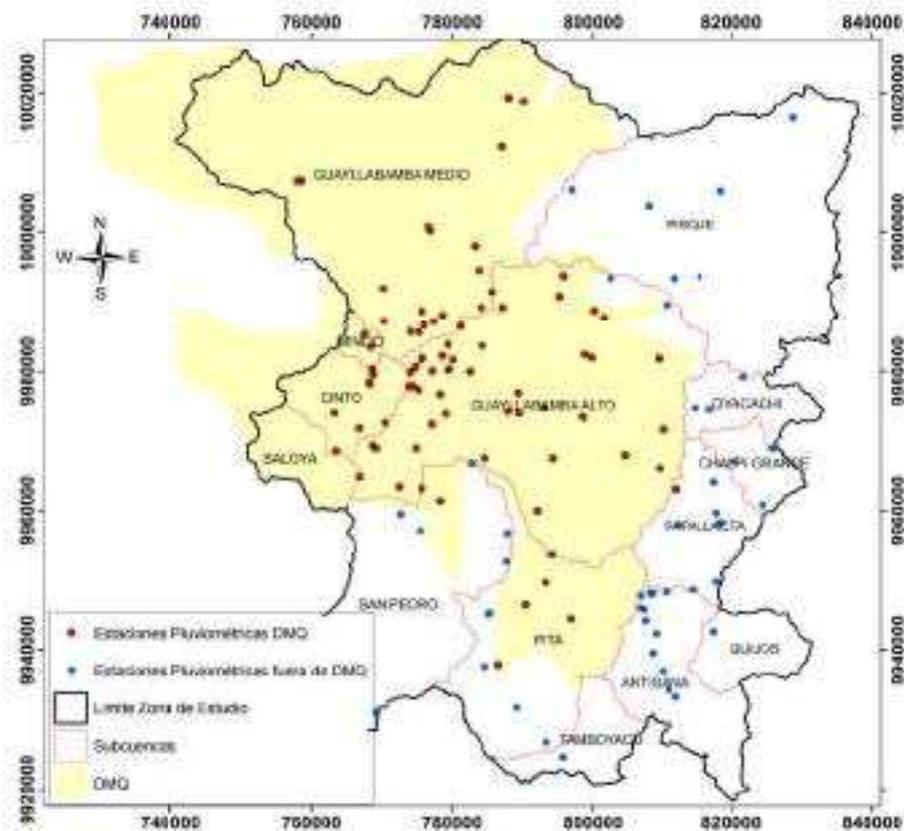
ELABORADO POR: Christian Díaz

Para la generación de la base de datos se ha considerado también una clasificación de estaciones ubicadas en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), en donde existen edificaciones de altura variable y con cobertura vegetal natural escasa. En estas zonas se producen condiciones climáticas muy localizadas (islas urbanas) que son gobernadas por la naturaleza de las diferentes superficies que presentan diferentes albedos, calentamiento diferencial importante entre el día y la noche y bloqueos de flujos de viento por la infraestructura propia de la ciudad. Se presenta la variabilidad captada por los productos satelitales para distintos regímenes de precipitación en el sector urbano (DMQ) y rural (zona fuera del DMQ) de la zona de estudio (Figura 4.1). En la Figura 4.2 se observa la distribución espacial de las estaciones en toda la zona de estudio. Dentro del DMQ existe una notable concentración de estaciones en el centro de la ciudad, pero pertenecientes a distintas instituciones. Existen 96 estaciones pluviométricas (estaciones de color rojo) que pertenecen al DMQ y 62 estaciones pluviométricas (estaciones de color azul) fuera de esta zona.



**FIGURA 4.1:** Clasificación de regímenes de precipitación en la zona de estudio  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 4.1, se presenta la precipitación observada por los pluviómetros y la precipitación estimada por los productos satelitales, para el sector urbano y rural. En la zona de estudio se dan 2 regímenes de precipitación: unimodal y bimodal, que se visualizan en la Figura 4.1 y que no son representados por los productos satelitales TMPA e IMERG. Estos productos satelitales captan la precipitación en forma cualitativa para las estaciones pertenecientes al régimen bimodal para el sector urbano y rural.



**FIGURA 4.2:** Distribución de las estaciones de precipitación en el DMQ  
ELABORADO POR: Christian Díaz

La información satelital recopilada consisten en imágenes en formato .netCDF, que mediante la herramienta R Studio se convierten en raster y mediante la posición de cada estación se extrae el valor correspondiente. A continuación, en la Tabla 4.3 se observa un ejemplo de la precipitación mensual (1998-2016) de algunas estaciones extraídas de las imágenes satelitales correspondientes al producto TMPA v7.

**TABLA 4.3:** Precipitación mensual de datos satelitales TMPA v7.

Mes	Año	C09	P44	P29	C04	C03	P32	M5021	M5024	M0111	P35
1	1998	101.41	99.63	123.02	123.02	123.02	123.02	94.96	99.63	103.25	89.69
2	1998	134.29	126.39	156.57	156.57	156.57	156.57	118.90	126.39	119.93	121.61
3	1998	168.86	166.63	202.39	202.39	202.39	202.39	157.92	166.63	165.65	155.86
4	1998	199.49	180.88	200.68	200.68	200.68	200.68	170.22	180.88	163.91	164.27
5	1998	202.73	194.19	182.92	182.92	182.92	182.92	184.66	194.19	189.08	162.73
6	1998	128.80	113.95	67.21	67.21	67.21	67.21	99.67	113.95	81.14	69.06
7	1998	91.64	85.37	57.75	57.75	57.75	57.75	80.65	85.37	63.29	56.52
8	1998	102.29	91.70	47.35	47.35	47.35	47.35	83.55	91.70	54.69	62.30
9	1998	69.03	67.42	55.05	55.05	55.05	55.05	68.39	67.42	60.23	53.89
1	1998	183.58	168.40	91.93	91.93	91.93	91.93	155.66	168.40	135.35	122.59
11	1998	181.81	184.45	103.63	103.63	103.63	103.63	169.19	184.45	148.37	139.80
12	1998	107.69	102.37	60.72	60.72	60.72	60.72	94.39	102.37	100.37	73.95
1	1999	155.70	145.42	106.21	106.21	106.21	106.21	145.15	145.42	171.83	113.64
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	2016	46.78	37.18	17.59	17.59	17.59	17.59	32.42	37.18	22.27	25.17
9	2016	122.85	106.70	59.87	59.87	59.87	59.87	98.15	106.70	88.44	76.88
1	2016	121.66	113.40	89.29	89.29	89.29	89.29	114.26	113.40	111.89	100.55
11	2016	92.16	83.16	40.63	40.63	40.63	40.63	79.66	83.16	70.84	58.11
12	2016	110.74	109.68	86.64	86.64	86.64	86.64	115.45	109.68	108.39	101.97

ELABORADO POR: Christian Díaz

Come se puede ver, las estaciones P29, C04, C03 y P32, tienen valores similares debido a que se encuentran dentro del mismo pixel para el producto satelital TMPA v7. De la misma manera, las estaciones P44 y M5024, poseen valores similares porque se encuentran cercanas y pertenecen al mismo pixel.

#### 4.1.2 SELECCIÓN DE ESTACIONES

Se analizó los datos de los 158 pluviómetros. De este total de pluviómetros se descartaron 25 debido a que no tienen información para el periodo de estudio que comprende (1998-2016) y 2 estaciones, por encontrarse fuera del área de estudio. De modo que, el estudio comprende la utilización de 131 estaciones distribuidas en toda la zona de influencia FONAG-EPMAPS.

Según la Tabla 3.4 las estaciones pluviométricas quedan clasificadas como se presenta en la Tabla 4.4

**TABLA 4.4:** Clasificación según calidad de información diaria de precipitación

Código	Estación	Años registro	% Vacíos	Clase
C09	La Mica Campamento	2000 - 2008	27.12	C
C10	La Mica Presa	2008 - 2016	3.14	C
JTU.01.PT.11	JTU.01.PT.11	2013 - 2016	41.84	D
JTU.01.PT.22	JTU.01.PT.22	2013 - 2016	40.33	D
JTU.01.PT.32	JTU.01.PT.32	2013 - 2016	42.59	D
JTU.01.PT.42	JTU.01.PT.42	2014 - 2016	26.39	D
JTU.01.PT.52	JTU.01.PT.52	2014 - 2015	0.00	D
JTU.01.PT.63	JTU.01.PT.63	2013 - 2016	31.22	D
JTU.01.PT.73	JTU.01.PT.73	2014 - 2016	0.00	D

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.4:** Clasificación según calidad de información diaria de precipitación (cont...)

Código	Estación	Años registro	% Vacíos	Clase
JTU.01.PT.83	JTU.01.PT.83	2013 - 2016	27.27	D
P42	Antisana R. Huañuna	2003 - 2017	8.28	B
P43	Antisana Limboasi	2008 - 2017	10.13	C
P55	Antisana Diguchi	2009 - 2017	0.00	C
P44	Guaytaloma	2004 - 2014	7.89	B
P46	Chalpi Grande	2006 - 2017	31.58	B
P64	Laguna Encantada	2011 - 2017	3.35	C
LLO.01.PO.01	LLO.01.PO.01	2013 - 2015	63.40	D
LLO.01.PO.02	LLO.01.PO.02	2013 - 2016	54.54	D
LLO.02.PO.01	LLO.02.PO.01	2013 - 2016	53.10	D
LLO.02.PO.02	LLO.02.PO.02	2013 - 2016	48.97	D
M0354	SAN JUAN-PICHINCHA(CHILLOG.)	1998 - 2015	5.35	B
P29	Palmira	2002 - 2017	23.94	B
P30	Santa Rosa	2002 - 2017	36.71	B
BELISARIO	BELISARIO	2004 - 2017	5.85	B
C04	Rumipamba	2000 - 2014	23.98	B
C05	Bellavista	2000 - 2017	11.89	B
C06	Yaruquí	2000 - 2017	18.31	B
EL CAMAL	EL CAMAL	2004 - 2017	21.65	B
GUAMANI	GUAMANI	2008 - 2017	6.17	C
M0002	LA TOLA	1998 - 2015	0.09	B
M0010	MONTESERRIN	1998 - 2001	10.11	D
M0024	QUITO INAMHI-INNAQUITO	1998 - 2015	1.83	B
M0114	TUMBACO	1998 - 2012	68.49	B
M0335	LA CHORRERA	1998 - 2016	1.88	B
M0341	GUAYLLABAMBA	1998 - 1999	0.00	D
M0343	EL QUINCHE-PICHINCHA	1998 - 2015	2.78	B
M0345	CALDERÓN	1998 - 2016	4.85	B
M0346	YARUQUI INAMHI	1998 - 2016	2.88	B
M0357	CANAL 10 TV.	1998 - 2016	2.82	B
M5031	Chumillos completa	2009 - 2016	20.34	C

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.4:** Clasificación según calidad de información diaria de precipitación (cont...)

Código	Estación	Años registro	% Vacíos	Clase
M5074	M. Puntas	2012 - 2016	0.06	D
M5075	M. Itulcachi	2011 - 2016	3.21	D
M5078	P. Pifo	2011 - 2016	0.72	D
P08	Rumipamba Bodegas	2000 - 2016	40.95	B
P09	Iñaquito INAMHI	2000 - 2017	14.78	B
P10	DAC Aeropuerto	2000 - 2011	29.45	B
P11	Antenas	2000 - 2013	11.63	B
P12	Toctiuco	2001 - 2017	14.61	B
P13	Cumbayá	2000 - 2016	24.96	B
P14	Zámbiza	2004 - 2016	41.05	B
P15	El Cinto	2000 - 2017	8.96	B
P17	El Tingo	2000 - 2015	19.91	B
P19	La Tola (Tumbaco)	2000 - 2016	34.77	B
P21	R. Grande 1 (Chillog)	2000 - 2005	2.68	C
P22	Chillogallo	2005 - 2017	18.32	B
P23	Atacazo	2000 - 2013	12.95	B
P24	Observatorio	2005 - 2008	28.42	D
P25	El Troje	2000 - 2017	6.04	B
P26	Puengasí	2005 - 2017	2.41	B
P27	San Francisco	2003 - 2017	45.30	B
P28	Cruz Loma	2004 - 2017	38.14	B
P33	Nunalviro	2002 - 2007	27.19	C
P41	Guayllabamba Hacienda	2008 - 2017	8.70	C
P45	El Quinche	2005 - 2016	59.69	B
P52	Pintag	2008 - 2017	9.64	C
P56	Tanque Solanda	2010 - 2016	47.70	C
P63	La Virgen Papallacta	2012 - 2017	10.24	C
P67	Relleno El Inga	2012 - 2016	55.02	D
P70	CC El Bosque	2015 - 2017	20.04	D
TUMBACO	TUMBACO	2004 - 2017	5.34	B
C02	Rumihurco	2000 - 2017	19.31	B
C03	Rumihurco	2000 - 2006	34.56	C
C07	San Antonio	2000 - 2017	14.81	B
CARAPUNGO	CARAPUNGO	2004 - 2017	6.00	B

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.4:** Clasificación según calidad de información diaria de precipitación (cont...)

Código	Estación	Años registro	% Vacíos	Clase
COTOCOLLAO	COTOCOLLAO	2004 - 2017	7.19	B
M0337	SAN JOSE DE MINAS	1998 - 2016	1.51	B
M0339	NANEGALITO	1998 - 2016	2.83	B
M0358	CALACALI INAMHI	1998 - 2016	0.98	B
M0361	NONO	1998 - 2015	3.89	B
M1200	POMASQUI	1998 - 2003	23.09	C
P03	Rumihurco Machángara	2000 - 2017	15.03	B
P05	Rumihurco Occidental	2002 - 2006	25.07	D
P20	Calderón	2000 - 2017	44.12	B
P31	Pichán	2002 - 2017	56.66	B
P58	Nanegalito	2012 - 2017	22.75	C
P59	Calacalí	2010 - 2016	49.20	C
P60	San José de Minas	2010 - 2016	44.57	C
P61	Perucho	2012 - 2016	59.58	D
P71	Collaloma Medio	2016 - 2017	21.98	D
P72	Colinas Alto	2016 - 2017	0.00	D
P32	Mindo Bajo	2002 - 2006	46.79	D
P48	Mindo Captación	2008 - 2017	33.82	C
C13	Salve Faccha	2015 - 2017	27.33	D
M5021	Salvefacha Oyacachi	2007 - 2016	14.22	C
P37	Salve Faccha	2004 - 2015	12.77	B
P68	Salve Faccha Alto	2012 - 2017	1.06	C
M0188	PAPALLACTA	1998 - 2015	32.83	B
M5022	Pluviómetrica Control Baños	2010 - 2016	1.49	C
M5023	Pluviómetrica Papallacta	2010 - 2016	11.98	C
M5024	El Tambo	2010 - 2016	0.00	C
M5025	La Virgen Papallacta	2007 - 2016	28.11	C
P34	Papallacta	2003 - 2017	8.35	B
P62	Blanco Chico Alto	2011 - 2017	1.97	C

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.4:** Clasificación según calidad de información diaria de precipitación (cont...)

Código	Estación	Años registro	% Vacíos	Clase
P65	Laguna Santa Lucia	2011 - 2017	0.00	C
M0009	LA VICTORIA INERHI	1998 - 2015	0.13	B
M0023	OLMEDO-PICHINCHA	1998 - 2015	16.43	B
M0111	MALCHINGUI INAMHI	1998 - 2006	9.30	C
M0344	CANGAHUA	2002 - 2016	13.39	B
M0359	CAYAMBE	1998 - 2015	16.31	B
M1094	TOMALON-TABACUNDO	1998 - 2016	0.02	B
C11	Pita Campamento	2011 - 2017	15.22	C
M0364	LORETO PEDREGAL	1998 - 2016	2.38	B
M5026	Cotopaxi Control Norte	2007 - 2016	7.37	C
M5028	Miranda completa	2009 - 2016	6.59	C
M5029	El Carmen completa	2009 - 2016	2.78	C
M5030	Gordillo Pluviométrica	2010 - 2016	2.61	C
M5076	P.Mudadero	2012 - 2016	6.74	D
P35	Bocatoma Pita	2002 - 2011	46.85	C
P39	Yangahuagra	2003 - 2016	17.50	B
P54	El Carmen	2009 - 2016	47.77	C
P38	San Simon	2003 - 2016	18.32	B
C08	IASA	2001 - 2017	22.45	B
LOS CHILLOS	LOS CHILLOS	2004 - 2017	9.24	B
M0003	IZOBAMBA	1998 - 2015	0.03	B
M0113	UYUMBICHO	1998 - 2015	2.84	B
M0118	INIAP-SUPLEMEN. PORCINOS	1998 - 2000	26.82	D
M0120	COTOPAXI-CLIRSEN	1999 - 2014	9.97	B
M0353	RUMIPAMBA-PICHINCHA	1998 - 2016	10.70	B

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.4:** Clasificación según calidad de información diaria de precipitación (cont...)

Código	Estación	Años registro	% Vacíos	Clase
M5027	Loma Urco Ilinizas	2007 - 2016	7.38	C
M5077	P.REI	2011 - 2016	1.62	D
C01	Maucatambo	2003 - 2015	23.06	B
Clase de Estación: A(> 20 años), B(10-20 años), C(5-10 años) y D(< 5 años)				

ELABORADO POR: Christian Díaz

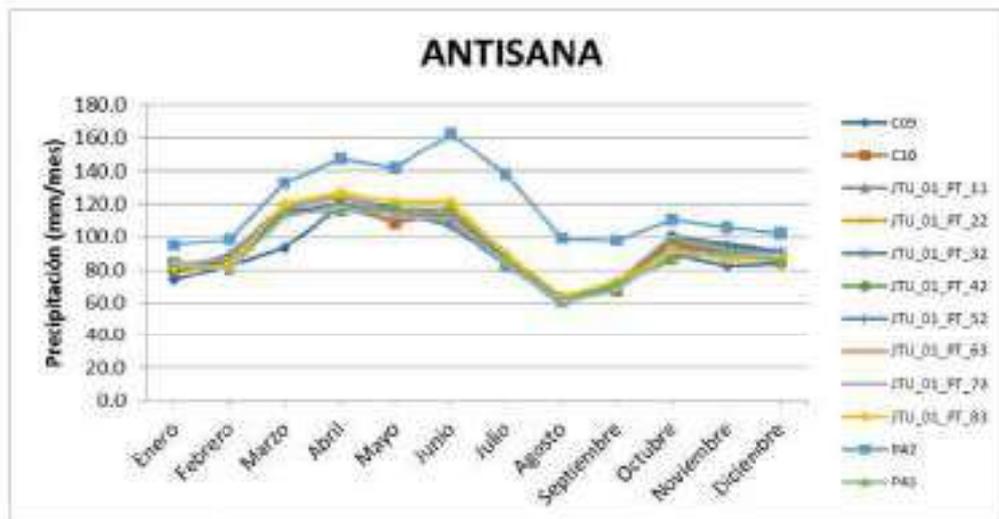
En el Anexo 2 se presenta la precipitación para las estaciones seleccionadas por subcuenca. Después de un análisis cualitativo de las estaciones y gráficamente se pudo determinar el tipo de régimen de precipitación para las subcuencas dentro del área de estudio, como se describe en la Tabla 4.5.

**TABLA 4.5:** Tipo de Régimen de precipitación

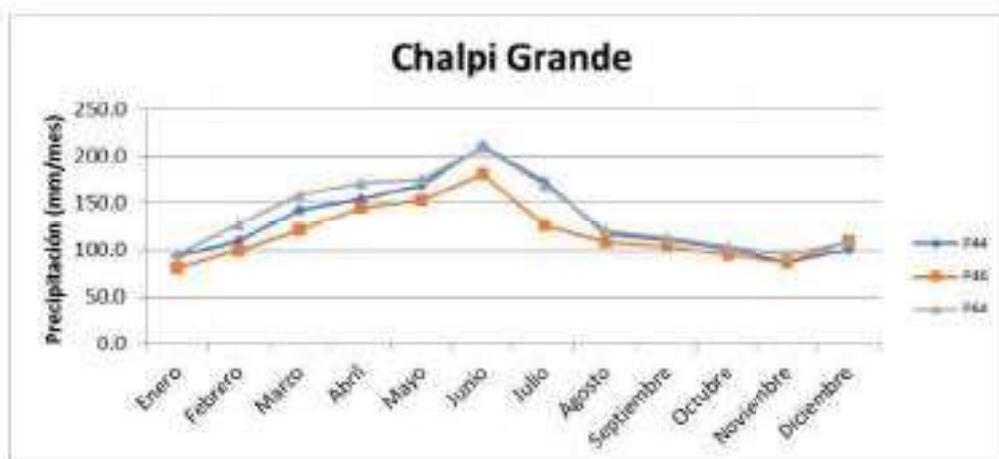
Subcuenca	Régimen Unimodal	Régimen Bi-modal	Régimen de Transición
Antisana			x
Chalpi Grande	x		
Cinto		x	
Guayllabamba Alto		x	
Guayllabamba Medio		x	
Mindo		x	
Oyacachi	x		
Papallacta	x		
Pisque		x	
Pita		x	
Quijos			x
San Pedro		x	
Tamboyacu	x		

ELABORADO POR: Christian Díaz

Los gráficos de medias mensuales multianuales (1998-2016) de algunas subcuencas de la zona de estudio se muestran a continuación:



**FIGURA 4.3:** Medias mensuales multianuales (1998-2016) para la subcuenca Antisana  
Elaborado por: Christian Díaz



**FIGURA 4.4:** Medias mensuales multianuales (1998-2016) para la subcuenca Chalpi Grande  
Elaborado por: Christian Díaz

En la Figura 4.3 se muestra una subcuenca cuyo régimen es de transición y se observa la representación de todas las estaciones que se encuentran en ella. Las subcuencas de régimen bimodal son: Cinto, Guayllabamba Alto, Guayllabamba Medio, Mindo, Pisque, Pita y San Pedro. En la Figura 4.4 se tiene una subcuenca de régimen unimodal. Oyacachi y Papallacta también presenta este tipo de régimen. Los gráficos de medias mensuales por subcuenca se encuentran en el Anexo 3.

Se determinó la cantidad de estaciones por institución pertenecientes a cada subcuenca, el resultado se presenta en Tabla 4.6.

**TABLA 4.6:** Clasificación de estaciones por subcuenca

SUBCUENCAS	EPMAPS	FONAG	IMHEA	INAMHI	SA	Total General
Antisana	5		8			13
Chalpi Grande	3					3
Cinto	2		4	1		7
Guayllabamba Alto	29	4		10	4	47
Guayllabamba Medio	13			5	2	20
Mindo	2					2
Oyacachi	3	1				4
Papallacta	3	4		1		8
Pisque				6		6
Pita	4	5		1		10
Quijos	1					1
San Pedro	1	2		5	1	9
Tamboyacu	1					1
Total General	67	16	12	29	7	131

ELABORADO POR: Christian Díaz

### 4.1.3 CONTROL DE CALIDAD

Durante este proceso de control de calidad se eliminan valores negativos de precipitación y extremos, que corresponden a valores dudosos que no son tomados en cuenta antes de la agregación a nivel mensual. Además se realiza la conversión de la precipitación a *mm* para distintos pluviómetros pertenecientes a EPMAPS. (Tabla 4.7)

**TABLA 4.7:** Control de calidad y conversión para la estación P08

FECHA	HORA	RAW	P (mm)
01-jul-00	0:00	3164	0.0
01-jul-00	23:55	3164	0.0
02-jul-00	0:00	3164	0.0
02-jul-00	23:55	3164	0.0
03-jul-00	0:00	3164	0.0
03-jul-00	23:55	3164	0.0
04-jul-00	0:00	3164	0.0
04-jul-00	23:55	3164	0.0
05-jul-00	0:00	3164	0.0
05-jul-00	23:55	3164	0.0
06-jul-00	0:00	3164	0.0
06-jul-00	15:40	3164	0.0
06-jul-00	15:45	3165	0.1
06-jul-00	15:50	3167	0.2
06-jul-00	15:55	3168	0.1
06-jul-00	16:00	3172	0.4

ELABORADO POR: Christian Díaz

Como se puede ver, en este caso el pluviómetro P08 perteneciente a EPMAPS tiene una resolución temporal de 5 minutos, viene expresada en *RAW*, por lo que es necesario convertirla a *mm*. La mayoría de estaciones pertenecientes a esta institución tienen el mismo formato (*Fecha - Hora - Raw*).

En la Tabla 4.8, se puede observar el control de calidad de la información para estaciones pertenecientes a EPMAPS y FONAG. Es necesario mencionar que la resolución temporal de

estas estaciones pluviométricas corresponde a observaciones cada 5 minutos para EPMAPS y a nivel horario para FONAG, donde se produjeron datos negativos y extremos por lo que fueron eliminados.

**TABLA 4.8:** Tabla resumen de control de calidad para estaciones pluviométricas

Estación	Institución	Nº Datos	Datos Totales	Eliminados	% Eliminado
C10	EPMAPS	869228	899050	29822	3.32
P25	EPMAPS	1694209	1810865	116656	6.44
P26	EPMAPS	1291205	1325196	33991	2.56
P55	EPMAPS	766248	766325	77	0.01
P62	EPMAPS	674974	688318	13344	1.94
P64	EPMAPS	579981	600725	20744	3.45
P68	EPMAPS	538003	544053	6050	1.11
P72	EPMAPS	119804	119805	1	0.00
M5028	FONAG	53994	55658	1664	2.99

ELABORADO POR: Christian Díaz

Como se puede ver en la Tabla 4.8, el porcentaje de datos eliminados es muy bajo por lo que no es necesario descartar a la estación. Para la mayoría de estaciones se puede decir que poseen información confiable, ya que no presentaron este tipo de inconsistencias (negativos y extremos), por lo que se puede continuar con el proceso de agregación mensual y demás procesos posteriores.

#### 4.1.4 AGREGACIÓN MENSUAL

Después del control de calidad se realiza la agregación mensual para cada estación, donde se obtiene una base de datos mensuales con las siguientes características descritas en la Tabla 4.9.

**TABLA 4.9:** Disponibilidad de Información a nivel mensual

Estación	Nº Datos	Nº Vacíos	% Vacíos	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Tendencia
C09	77	20	20.6	210.5	0.7	aumento
C10	103	0	0.0	199.3	5.2	decremento
JTU.01.PT.11	26	0	0.0	121.2	3.1	decremento
JTU.01.PT.22	28	0	0.0	117.0	0.7	decremento
JTU.01.PT.32	27	1	3.6	119.1	0.4	decremento
JTU.01.PT.42	26	0	0.0	161.5	10.1	decremento
JTU.01.PT.52	13	0	0.0	161.6	2.3	aumento
JTU.01.PT.63	31	0	0.0	159.7	11.1	decremento
JTU.01.PT.73	29	0	0.0	166.0	13.6	decremento
JTU.01.PT.83	28	0	0.0	147.1	9.4	decremento
P42	151	8	5.0	373.7	0.2	aumento
P43	98	3	3.0	202.1	3.8	aumento
P55	87	0	0.0	160.5	12.8	decremento
P44	129	2	1.5	333.8	0.5	aumento
P46	97	19	16.4	454.6	4.3	aumento

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

TABLA 4.9: Disponibilidad de Información a nivel mensual (cont...)

Estación	Nº Datos	Nº Vacíos	% Vacíos	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Tendencia
P64	63	0	0.0	442.2	23.3	aumento
LLO.01_PO.01	27	8	22.9	257.8	2.2	decremento
LLO.01_PO.02	34	2	5.6	215.4	3.2	decremento
LLO.02_PO.01	36	0	0.0	208.2	0.2	aumento
LLO.02_PO.02	37	0	0.0	247.8	4.6	decremento
M0354	202	13	6.0	508.8	0.1	decremento
P29	170	4	2.3	309.4	0.7	decremento
P30	166	8	4.6	308.4	2.2	decremento
BELISARIO	155	2	1.3	331.0	0.2	aumento
C04	131	35	21.1	339.5	0.1	aumento
C05	186	15	7.5	327.7	0.1	decremento
C06	165	31	15.8	238.0	0.1	decremento
EL.CAMAL	131	26	16.6	411.4	0.1	aumento
GUAMANI	100	0	0.0	319.8	0.2	decremento
M0002	215	3	1.4	263.8	0.1	decremento
M0010	33	6	15.4	158.0	1.7	decremento
M0024	212	6	2.8	372.9	0.1	decremento
M0114	50	120	70.6	283.5	3.0	aumento
M0335	207	13	5.9	440.2	2.5	decremento
M0341	18	0	0.0	95.2	4.6	aumento
M0343	190	27	12.4	121.6	0.3	decremento
M0345	184	36	16.4	223.1	0.1	decremento
M0346	207	12	5.5	291.3	0.2	decremento
M0357	208	12	5.5	319.9	1.3	decremento
M5031	67	14	17.3	327.9	0.2	decremento
M5074	55	0	0.0	216.2	0.7	aumento
M5075	53	0	0.0	423.4	0.6	decremento
M5078	55	0	0.0	193.2	0.9	decremento
P08	174	15	7.9	265.3	0.2	decremento
P09	180	21	10.4	229.4	0.1	decremento
P10	121	18	12.9	329.0	0.2	aumento
P11	145	11	7.1	285.7	0.1	aumento
P12	179	14	7.3	276.4	0.9	decremento
P13	176	17	8.8	286.1	0.1	aumento
P14	143	5	3.4	195.2	0.1	decremento
P15	180	19	9.5	321.7	1.3	aumento
P17	160	22	12.1	418.4	0.1	aumento
P19	176	17	8.8	215.1	0.1	aumento
P21	66	0	0.0	180.4	0.5	aumento
P22	127	6	4.5	270.9	0.2	decremento

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

TABLA 4.9: Disponibilidad de Información a nivel mensual (cont...)

Estación	Nº Datos	Nº Vacíos	% Vacíos	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Tendencia
P23	153	11	6.7	308.8	0.3	decremento
P24	27	9	25.0	232.0	0.7	decremento
P25	196	5	2.5	353.5	0.7	aumento
P26	144	1	0.7	309.8	0.6	decremento
P27	156	7	4.3	515.3	0.2	decremento
P28	155	2	1.3	331.9	1.2	decremento
P33	61	1	1.6	393.1	17.8	decremento
P41	97	3	3.0	114.6	0.3	decremento
P45	118	10	7.8	153.6	0.2	decremento
P52	96	3	3.0	209.3	0.1	decremento
P56	69	1	1.4	330.1	0.9	decremento
P63	58	1	1.7	174.6	3.9	aumento
P67	39	3	7.1	194.2	0.2	decremento
P70	11	1	8.3	264.6	0.4	decremento
TUMBACO	153	4	2.5	200.2	0.1	aumento
C02	166	35	17.4	275.9	0.1	aumento
C03	50	22	30.6	220.6	0.1	aumento
C07	176	24	12.0	217.5	0.1	decremento
CARAPUNGO	156	1	0.6	195.4	0.1	aumento
COTOCOLLAO	156	1	0.6	199.1	0.1	aumento
M0337	211	8	3.7	312.0	1.0	decremento
M0339	212	8	3.6	651.1	0.3	decremento
M0358	206	14	6.4	233.8	0.2	decremento
M0361	197	20	9.2	326.0	0.4	decremento
M1200	49	15	23.4	136.0	4.1	decremento
P03	181	19	9.5	272.6	1.0	aumento
P05	38	7	15.6	274.6	0.8	decremento
P20	186	13	6.5	176.6	0.2	decremento
P31	146	25	14.6	230.2	0.2	aumento
P58	59	0	0.0	460.2	9.9	decremento
P59	70	1	1.4	285.8	0.1	decremento
P60	65	2	3.0	238.4	0.8	decremento
P61	50	2	3.8	108.5	0.5	aumento
P71	10	0	0.0	152.9	0.6	decremento
P72	10	0	0.0	198.9	3.6	decremento
P32	35	8	18.6	355.9	0.2	decremento
P48	104	4	3.7	488.2	0.2	decremento
C13	14	0	0.0	126.4	2.8	aumento
M5021	108	6	5.3	594.8	3.0	decremento
P37	129	9	6.5	266.9	2.9	aumento

Sigue en la siguiente página

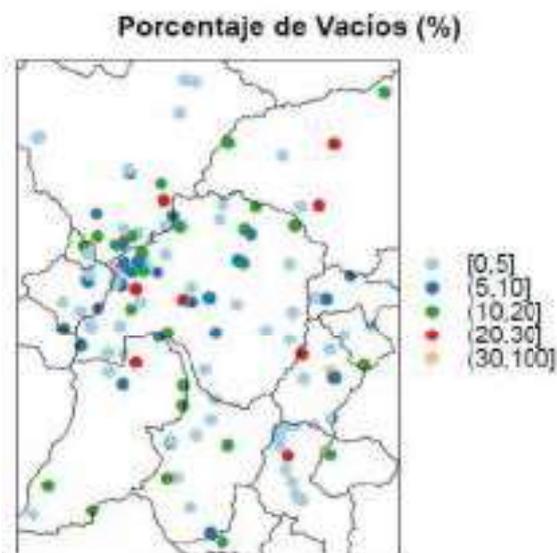
(Viene de la página anterior)

TABLA 4.9: Disponibilidad de Información a nivel mensual (cont...)

Estación	Nº Datos	Nº Vacíos	% Vacíos	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Tendencia
P68	60	0	0.0	170.1	9.1	aumento
M0188	149	69	31.7	415.9	1.7	aumento
M5022	76	0	0.0	795.1	1.5	aumento
M5023	71	5	6.6	285.3	6.2	aumento
M5024	74	0	0.0	317.6	17.1	aumento
M5025	84	25	22.9	476.3	7.8	decremento
P34	160	9	5.3	262.8	6.7	decremento
P62	72	0	0.0	657.4	19.3	aumento
P65	61	0	0.0	191.3	2.5	decremento
M0009	205	6	2.8	162.2	0.1	decremento
M0023	184	34	15.6	225.3	0.4	decremento
M0111	93	12	11.4	141.5	0.3	decremento
M0344	118	42	26.3	167.3	2.1	decremento
M0359	171	45	20.8	539.9	1.5	decremento
M1094	216	4	1.8	170.8	0.6	decremento
C11	57	7	10.9	252.7	0.1	decremento
M0364	208	11	5.0	304.1	3.5	decremento
M5026	99	15	13.2	192.6	0.3	decremento
M5028	80	1	1.2	346.8	0.1	decremento
M5029	72	9	11.1	239.6	3.3	decremento
M5030	77	0	0.0	258.8	0.6	decremento
M5076	54	0	0.0	168.6	4.9	aumento
P35	107	3	2.7	335.5	0.2	aumento
P39	144	8	5.3	293.8	5.5	aumento
P54	82	0	0.0	234.2	1.1	decremento
P38	130	19	12.8	195.1	10.2	decremento
C08	154	28	15.4	316.5	0.1	decremento
LOS CHILLOS	149	8	5.1	443.8	1.0	aumento
M0003	216	2	0.9	326.2	3.1	decremento
M0113	205	13	6.0	326.1	0.8	aumento
M0118	27	8	22.9	295.8	16.2	decremento
M0120	159	22	12.2	268.5	6.2	aumento
M0353	181	38	17.4	1034.9	4.2	aumento
M5027	95	11	10.4	270.0	0.3	decremento
M5077	52	2	3.7	225.3	0.7	decremento
C01	128	19	12.9	216.2	0.5	aumento

ELABORADO POR: Christian Díaz

Para la mayoría de estaciones el porcentaje de vacíos es menor al 20% por lo que se mantienen las 131 estaciones seleccionadas. Existen 10 estaciones entre 20%-30% que se mantienen por hallarse en zonas donde se carece de información o que pertenecen a subcuencas con pocas estaciones pluviométricas (Figura 4.5).



**FIGURA 4.5:** Porcentaje de vacíos (%) en estaciones pluviométricas posterior a la agregación mensual  
ELABORADO POR: Christian Díaz

#### 4.1.5 HOMOGENIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En la Tabla 4.10 se indican las estaciones que han sido corregidas mediante el análisis regional de dobles masas y el proceso de homogenización de la información; donde  $x$  es la estación independiente y  $y$  es la estación dependiente.

**TABLA 4.10:** Pares de Estaciones con Información Pluviométrica que fueron corregidas mediante las curvas de doble masa

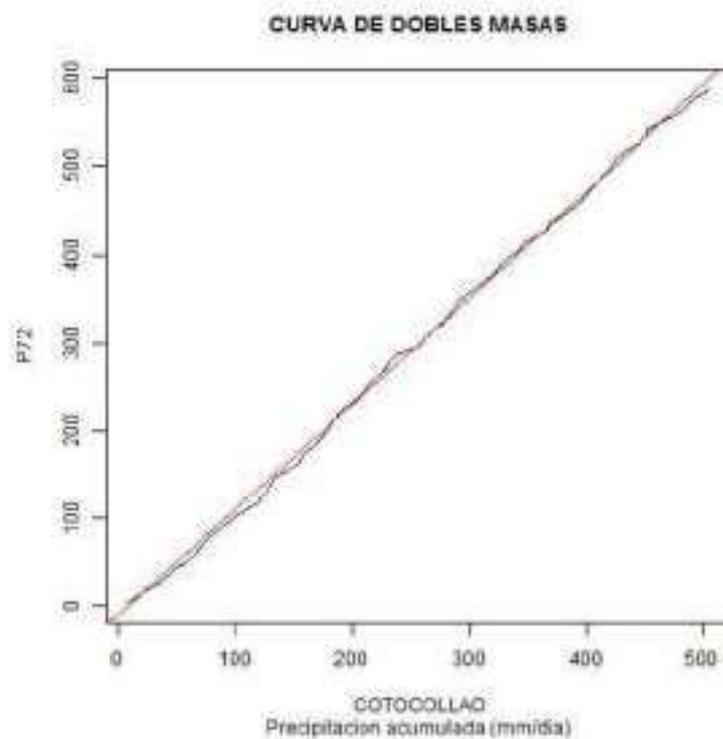
x	y	R	Nº datos corregidos
C11	P35	0.99	1
JTU.01.PT.22	JTU.01.PT.32	0.97	4
JTU.01.PT.63	JTU.01.PT.73	0.97	0
COTOCOLLAO	P72	0.94	2
C13	P68	0.93	0
C02	P03	0.83	1
C02	P72	0.82	6
P37	P68	0.82	1
C10	P55	0.81	2
BELISARIO	P70	0.8	2
C04	P28	0.8	6
C03	P05	0.8	6
GUAMANI	P25	0.79	7
M5024	M5025	0.79	4
M0024	P09	0.78	1
P42	P55	0.77	0
JTU.01.PT.22	JTU.01.PT.63	0.76	3
P44	P64	0.76	6
EL CAMAL	P70	0.76	0
C10	P42	0.75	4
M5024	P34	0.75	0
C09	C10	0.74	0
C10	P43	0.72	6
C04	P08	0.72	1
M0002	P70	0.72	7
C02	P71	0.71	0
M5023	M5025	0.71	6
LLO.02.PO.02	P29	0.7	3
C05	M0024	0.7	6
P08	P09	0.7	1

ELABORADO POR: Christian Díaz

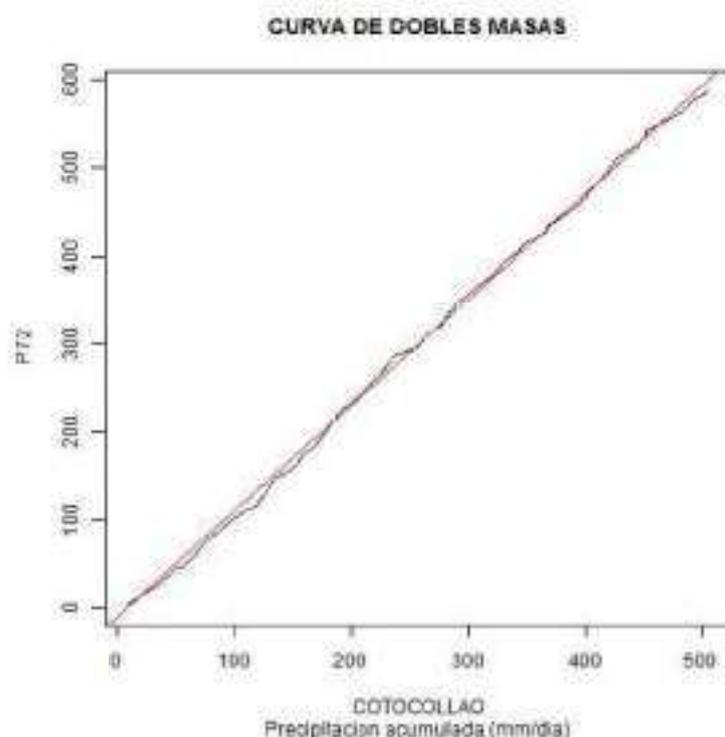
Adicionalmente se visualizan las curvas de doble masa con los valores acumulados de precipitación (Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8) para períodos de tiempo coincidentes de algunos pares de estaciones pluviométricas.



**FIGURA 4.6:** Curva de doble masa C11 - P35  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.7:** Curva de doble masa P72 - Cotocollao  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.8:** Curva de doble masa P09 - P08  
ELABORADO POR: Christian Díaz

Además, se ha evaluado la representatividad de la red activa de estaciones pluviométricas considerando la correlación entre las estaciones pertenecientes a la misma subcuenca (análisis regional). Para esto, se ha utilizado la información validada de 67 estaciones pluviométricas históricas de la EPMAPS, 16 de FONAG, 29 de INAMHI, 12 de IMHEA y 7 pertenecientes a SA, tomando en cuenta los datos mensuales corresponden al periodo 1998-2016.

En la Tabla 4.11 se presenta el resultado del control de calidad de la información mediante las técnicas de homogenización.

**TABLA 4.11:** Datos obtenidos después del proceso de homogenización

N°	Estación	Datos Iniciales	Datos procesados	N° Vacíos	% Vacíos
1	C09	77	77	20	20.6
2	C10	103	103	0	0.0
3	JTU.01.PT.11	26	26	0	0.0
4	JTU.01.PT.22	28	28	0	0.0
5	JTU.01.PT.32	27	27	1	3.6
6	JTU.01.PT.42	26	26	0	0.0
7	JTU.01.PT.52	13	13	0	0.0
8	JTU.01.PT.63	31	31	0	0.0
9	JTU.01.PT.73	29	29	0	0.0
10	JTU.01.PT.83	28	28	0	0.0

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.11:** Datos obtenidos después del proceso de homogenización (cont...)

N°	Estación	Datos Iniciales	Datos procesados	N° Vacíos	% Vacíos
11	P42	151	151	8	5.0
12	P43	98	98	3	3.0
13	P55	87	87	0	0.0
14	P44	129	129	2	1.5
15	P46	97	97	19	16.4
16	P64	63	63	0	0.0
17	LLO.01.PO.01	27	27	8	22.9
18	LLO.01.PO.02	34	34	2	5.6
19	LLO.02.PO.01	36	36	0	0.0
20	LLO.02.PO.02	37	37	0	0.0
21	M0354	202	202	13	6.0
22	P29	170	170	4	2.3
23	P30	166	166	8	4.6
24	BELISARIO	155	155	2	1.3
25	C04	131	131	35	21.1
26	C05	186	186	15	7.5
27	C06	165	165	31	15.8
28	EL CAMAL	131	131	26	16.6
29	GUAMANI	100	100	0	0.0
30	M0002	215	215	3	1.4
31	M0010	33	33	6	15.4
32	M0024	212	212	6	2.8
33	M0114	50	50	120	70.6
34	M0335	207	207	13	5.9
35	M0341	18	18	0	0.0
36	M0343	190	190	27	12.4
37	M0345	184	184	36	16.4
38	M0346	207	207	12	5.5
39	M0357	208	208	12	5.5
40	M5031	67	67	14	17.3
41	M5074	55	55	0	0.0
42	M5075	53	53	0	0.0
43	M5078	55	55	0	0.0
44	P08	174	174	15	7.9
45	P09	180	180	21	10.4
46	P10	121	121	18	12.9
47	P11	145	145	11	7.1
48	P12	179	179	14	7.3
49	P13	176	176	17	8.8
50	P14	143	143	5	3.4

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.11:** Datos obtenidos después del proceso de homogenización (cont...)

N°	Estación	Datos Iniciales	Datos procesados	N° Vacíos	% Vacíos
51	P15	180	180	19	9.5
52	P17	160	160	22	12.1
53	P19	176	176	17	8.8
54	P21	66	66	0	0.0
55	P22	127	127	6	4.5
56	P23	153	153	11	6.7
57	P24	27	27	9	25.0
58	P25	196	196	5	2.5
59	P26	144	144	1	0.7
60	P27	156	156	7	4.3
61	P28	155	155	2	1.3
62	P33	61	61	1	1.6
63	P41	97	97	3	3.0
64	P45	118	118	10	7.8
65	P52	96	96	3	3.0
66	P56	69	69	1	1.4
67	P63	58	58	1	1.7
68	P67	39	39	3	7.1
69	P70	11	11	1	8.3
70	TUMBACO	153	153	4	2.5
71	C02	166	166	35	17.4
72	C03	50	50	22	30.6
73	C07	176	176	24	12.0
74	CARAPUNGO	156	156	1	0.6
75	COTOCOLLAO	156	156	1	0.6
76	M0337	211	211	8	3.7
77	M0339	212	212	8	3.6
78	M0358	206	206	14	6.4
79	M0361	197	197	20	9.2
80	M1200	49	49	15	23.4
81	P03	181	181	19	9.5
82	P05	38	38	7	15.6
83	P20	186	186	13	6.5
84	P31	146	146	25	14.6
85	P58	59	59	0	0.0
86	P59	70	70	1	1.4
87	P60	65	65	2	3.0
88	P61	50	50	2	3.8
89	P71	10	10	0	0.0
90	P72	10	10	0	0.0

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.11:** Datos obtenidos después del proceso de homogenización (cont...)

N°	Estación	Datos Iniciales	Datos procesados	N° Vacíos	% Vacíos
91	P32	35	35	8	18.6
92	P48	104	104	4	3.7
93	C13	14	14	0	0.0
94	M5021	108	108	6	5.3
95	P37	129	129	9	6.5
96	P68	60	60	0	0.0
97	M0188	149	149	69	31.7
98	M5022	76	76	0	0.0
99	M5023	71	71	5	6.6
100	M5024	74	74	0	0.0
101	M5025	84	84	25	22.9
102	P34	160	160	9	5.3
103	P62	72	72	0	0.0
104	P65	61	61	0	0.0
105	M0009	205	205	6	2.8
106	M0023	184	184	34	15.6
107	M0111	93	93	12	11.4
108	M0344	118	118	42	26.3
109	M0359	171	171	45	20.8
110	M1094	216	216	4	1.8
111	C11	57	57	7	10.9
112	M0364	208	208	11	5.0
113	M5026	99	99	15	13.2
114	M5028	80	80	1	1.2
115	M5029	72	72	9	11.1
116	M5030	77	77	0	0.0
117	M5076	54	54	0	0.0
118	P35	107	107	3	2.7
119	P39	144	144	8	5.3
120	P54	82	82	0	0.0
121	P38	130	130	19	12.8
122	C08	154	154	28	15.4
123	LOS CHILLOS	149	149	8	5.1
124	M0003	216	216	2	0.9
125	M0113	205	205	13	6.0
126	M0118	27	27	8	22.9
127	M0120	159	159	22	12.2
128	M0353	181	181	38	17.4
129	M5027	95	95	11	10.4
130	M5077	52	52	2	3.7

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.11:** Datos obtenidos después del proceso de homogenización (cont...)

N°	Estación	Datos Iniciales	Datos procesados	N° Vacíos	% Vacíos
131	C01	128	128	19	12.9

ELABORADO POR: Christian Díaz

Como resultado se puede ver que según la Tabla 4.10 existen 30 estaciones con datos que se corrigieron mediante el análisis de doble masa; producto de ello el número de datos iniciales coincide con el número de datos procesados según la Tabla 4.11. También se realizó la homogenización mediante el paquete "RhTest v3", donde no se produjeron cambios significativos. Por lo que se optó por mantener las base obtenida con el análisis de doble masa.

#### 4.1.6 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En la Tabla 4.12 se puede observar como resultado la disponibilidad de información de acuerdo al criterio descrito en la Tabla 3.7.

**TABLA 4.12:** Clasificación según calidad de información pluviométrica

Estación	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002	Año 2003	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016
<b>ANTISANA</b>																			
C09																			
C10																			
JTU.01.PT.11																			
JTU.01.PT.22																			
JTU.01.PT.32																			
JTU.01.PT.42																			
JTU.01.PT.52																			
JTU.01.PT.63																			
JTU.01.PT.73																			
JTU.01.PT.83																			
P42																			
P43																			
P55																			
<b>CHALPI GRANDE</b>																			
P44																			
P46																			
P64																			
<b>CINTO</b>																			
LLO.01.PO.01																			
LLO.01.PO.02																			

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

TABLA 4.12: Clasificación según calidad de información pluviométrica (cont...)

Estación	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002	Año 2003	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016
LLO.02_PO.01																			
LLO.02_PO.02																			
M0354																			
P29																			
P30																			
<b>GUAYLLABAMBA ALTO</b>																			
BELISARIO																			
C04																			
C05																			
C06																			
EL CAMAL																			
GUAMANI																			
M0002																			
M0010																			
M0024																			
M0114																			
M0335																			
M0341																			
M0343																			
M0345																			
M0346																			
M0357																			
M5031																			
M5074																			
M5075																			
M5078																			
P08																			
P09																			
P10																			
P11																			
P12																			
P13																			
P14																			
P15																			
P17																			
P19																			
P21																			
P22																			
P23																			

Segue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

TABLA 4.12: Clasificación según calidad de información pluviométrica (cont...)

Estación	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002	Año 2003	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016
P24																			
P25																			
P26																			
P27																			
P28																			
P33																			
P41																			
P45																			
P52																			
P56																			
P63																			
P67																			
P70																			
TUMBACO																			
GUAYLLABAMBA MEDIO																			
C02																			
C03																			
C07																			
CARAPUNGO																			
COTOCOLLAO																			
M0337																			
M0339																			
M0358																			
M0361																			
M1200																			
P03																			
P05																			
P20																			
P31																			
P58																			
P59																			
P60																			
P61																			
P71																			
P72																			
MINDO																			
P32																			
P48																			
OYACACHI																			

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

TABLA 4.12: Clasificación según calidad de información pluviométrica (cont...)

Estación	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002	Año 2003	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016
C13																			
M5021																			
P37																			
P68																			
<b>PAPALLACTA</b>																			
M0188																			
M5022																			
M5023																			
M5024																			
M5025																			
P34																			
P62																			
P65																			
<b>PISQUE</b>																			
M0009																			
M0023																			
M0111																			
M0344																			
M0359																			
M1094																			
<b>PITA</b>																			
C11																			
M0364																			
M5026																			
M5028																			
M5029																			
M5030																			
M5076																			
P35																			
P39																			
P54																			
<b>QUIJOS</b>																			
P38																			
<b>SAN PEDRO</b>																			
C08																			
LOS CHILLOS																			
M0003																			
M0113																			
M0118																			

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.12:** Clasificación según calidad de información pluviométrica (cont...)

Estación	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002	Año 2003	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016
M0120																			
M0353																			
M5027																			
M5077																			
<b>TAMBOYACU</b>																			
C01																			
<b>Significado de Colores</b>																			
	menor a 20 %																		
	entre 20 % y 40 %																		
	entre 40 % y 60 %																		
	entre 60 % y 80 %																		
	mayor a 80 %																		

ELABORADO POR: Christian Díaz

Las series temporales de precipitación de las 131 estaciones constan en el Anexo 2 y la precipitación media mensual multianual por subcuenca de las estaciones pluviométricas y productos satelitales constan en el Anexo 3.

## 4.2 MÉTODOS DE RELLENO

### 4.2.1 MÉTODOS DE RELLENO TEMPORALES

#### 4.2.1.1 Regresión Lineal Simple

El relleno de la información se realizó en función de las ecuaciones de la Tabla 4.13 y cuyo coeficiente correlación es mayor a 0.7.

**TABLA 4.13:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple

Y	X	Correlación	Ecuación
C10	P42	0.75	$y = 18.06 + 0.46x$
P43	P42	0.77	$y = 8.1 + 0.51x$
P55	P42	0.77	$y = 21.85 + 0.38x$
P29	M0354	0.74	$y = 21.36 + 0.7x$
P30	M0354	0.85	$y = 9.4 + 0.77x$
C04	M0357	0.87	$y = 7.43 + 0.76x$
C06	M0346	0.82	$y = 9.62 + 0.66x$
GUAMANI	P23	0.83	$y = 27.25 + 1.08x$
M0114	P13	0.72	$y = -28.89 + 1.49x$
M5074	M5031	0.76	$y = 28.87 + 0.71x$
M5078	P19	0.82	$y = 5.23 + 0.97x$

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.13:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple (cont...)

Y	X	Correlación	Ecuación
P10	M0024	0.74	$y = 7.62 + 0.67x$
P11	M0357	0.81	$y = 10.3 + 0.62x$
P27	P12	0.72	$y = 35.88 + 1.03x$
P28	P12	0.75	$y = 37.78 + 1x$
P41	M0343	0.76	$y = 8.37 + 0.81x$
P45	M0343	0.75	$y = 15.58 + 1.02x$
P56	P25	0.75	$y = 2.15 + 0.59x$
M1200	P20	0.84	$y = 9.82 + 0.81x$
P58	M0339	0.93	$y = 14.31 + 0.82x$
P59	M0358	0.79	$y = -1.67 + 0.99x$
P61	M0337	0.75	$y = 6.37 + 0.27x$
P71	CARAPUNGO	0.91	$y = -1.86 + 0.92x$
P72	COTOCOLLAO	0.95	$y = -1.65 + 1.13x$
P68	P37	0.8	$y = 14.73 + 0.71x$
M5022	M0188	0.71	$y = 53.01 + 1.05x$
P65	P38	0.71	$y = 16.5 + 0.79x$
M0359	M1094	0.7	$y = 5.33 + 1.62x$
M5026	M0364	0.81	$y = 4.85 + 0.48x$
M5028	M0353	0.75	$y = 37.98 + 0.38x$
P54	M0353	0.77	$y = 25.83 + 0.29x$
LOS CHILLOS	P17	0.79	$y = 26.66 + 0.79x$
M0118	M0003	0.89	$y = 4.7 + 0.89x$

ELABORADO POR: Christian Díaz

**4.2.1.2 Regresión Lineal Simple con TMPA v7**

El relleno mediante la regresión lineal simple con TMPA v7 se realizó en función de las ecuaciones de la Tabla 4.14 y cuyo coeficiente de correlación es mayor a 0.7.

**TABLA 4.14:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con TMPA v7

X	Y	Correlación	Ecuación
tmpa.LLO.01.PO.01	LLO.01.PO.01	0.83	$y = -1.34 + 1.09x$
tmpa.LLO.01.PO.02	LLO.01.PO.02	0.81	$y = 9.35 + 0.96x$
tmpa.LLO.02.PO.01	LLO.02.PO.01	0.82	$y = 5.68 + 0.9x$
tmpa.LLO.02.PO.02	LLO.02.PO.02	0.84	$y = 3.08 + 1.08x$
tmpa.P29	P29	0.80	$y = 10.4 + 0.95x$
tmpa.P30	P30	0.79	$y = 14.36 + 0.88x$
tmpa.BELISARIO	BELISARIO	0.82	$y = -21.96 + 1.08x$
tmpa.C04	C04	0.81	$y = -2.48 + 0.99x$
tmpa.C05	C05	0.78	$y = -16.16 + 0.86x$
tmpa.C06	C06	0.75	$y = -8.27 + 0.6x$

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.14:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con TMPA v7 (cont...)

X	Y	Correlación	Ecuación
tmpa_GUAMANI	GUAMANI	0.87	$y = 5.26+1.15x$
tmpa_M0002	M0002	0.80	$y = -12.37+0.8x$
tmpa_M0024	M0024	0.89	$y = -26.7+1.15x$
tmpa_M0114	M0114	0.78	$y = -26.31+0.84x$
tmpa_M0335	M0335	0.77	$y = 2.79+1.21x$
tmpa_M0341	M0341	0.79	$y = -10.66+0.48x$
tmpa_M0343	M0343	0.76	$y = -11.42+0.41x$
tmpa_M0346	M0346	0.81	$y = -17.1+0.8x$
tmpa_M0357	M0357	0.85	$y = -2.61+1.17x$
tmpa_M5031	M5031	0.70	$y = -32.27+0.93x$
tmpa_M5078	M5078	0.78	$y = -13.46+0.76x$
tmpa_P09	P09	0.76	$y = -11.9+0.77x$
tmpa_P10	P10	0.73	$y = -17.97+0.86x$
tmpa_P11	P11	0.73	$y = 2.67+0.78x$
tmpa_P12	P12	0.81	$y = -4.46+0.83x$
tmpa_P13	P13	0.74	$y = -15.77+0.87x$
tmpa_P14	P14	0.74	$y = -11.37+0.51x$
tmpa_P15	P15	0.79	$y = 11.67+0.77x$
tmpa_P17	P17	0.73	$y = -14.33+0.97x$
tmpa_P23	P23	0.83	$y = 6.8+0.97x$
tmpa_P26	P26	0.84	$y = -12.41+0.96x$
tmpa_P27	P27	0.74	$y = 10.64+1.05x$
tmpa_P28	P28	0.78	$y = 9.93+1.03x$
tmpa_P41	P41	0.76	$y = -5.62+0.4x$
tmpa_P45	P45	0.72	$y = -4.76+0.5x$
tmpa_P56	P56	0.73	$y = -2.83+0.84x$
tmpa_P67	P67	0.70	$y = -4.94+0.73x$
tmpa_P70	P70	0.87	$y = -57.06+1.3x$
tmpa_TUMBACO	TUMBACO	0.73	$y = -5.95+0.64x$
tmpa_C02	C02	0.75	$y = 5.07+0.66x$
tmpa_C03	C03	0.80	$y = -12.13+0.79x$
tmpa_C07	C07	0.71	$y = -8.11+0.41x$
tmpa_CARAPUNGO	CARAPUNGO	0.76	$y = -10.64+0.63x$
tmpa_COTOCOLLAO	COTOCOLLAO	0.83	$y = -14.68+0.7x$
tmpa_M0337	M0337	0.83	$y = -28.07+1.19x$
tmpa_M0339	M0339	0.86	$y = -20.35+1.9x$
tmpa_M0358	M0358	0.79	$y = -10.85+0.61x$
tmpa_M0361	M0361	0.86	$y = -10.55+0.9x$
tmpa_M1200	M1200	0.82	$y = -15.49+0.57x$
tmpa_P03	P03	0.73	$y = 3.63+0.68x$
tmpa_P05	P05	0.76	$y = -9.67+0.82x$

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.14:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con TMPA v7 (cont...)

X	Y	Correlación	Ecuación
tmpa.P20	P20	0.73	$y = -12.79 + 0.56x$
tmpa.P58	P58	0.88	$y = -18.93 + 1.65x$
tmpa.P60	P60	0.84	$y = -33.28 + 1.01x$
tmpa.P61	P61	0.76	$y = -9.43 + 0.42x$
tmpa.P71	P71	0.80	$y = -16.29 + 0.69x$
tmpa.P48	P48	0.74	$y = 6.62 + 1.02x$
tmpa.M0009	M0009	0.83	$y = -22.87 + 0.56x$
tmpa.M0023	M0023	0.77	$y = -20.11 + 0.68x$
tmpa.M0111	M0111	0.86	$y = -16.57 + 0.51x$
tmpa.M1094	M1094	0.84	$y = -24.63 + 0.6x$
tmpa.M0364	M0364	0.79	$y = -8.29 + 1.2x$
tmpa.M5028	M5028	0.71	$y = -1.67 + 0.96x$
tmpa.P54	P54	0.74	$y = -7.38 + 0.73x$
tmpa.C08	C08	0.71	$y = -3.41 + 0.91x$
tmpa.LOS.CHILLOS	LOS.CHILLOS	0.73	$y = -3.99 + 1x$
tmpa.M0003	M0003	0.90	$y = 8.62 + 1.13x$
tmpa.M0113	M0113	0.78	$y = 13.73 + 0.97x$
tmpa.M0118	M0118	0.90	$y = -2.25 + 1.13x$
tmpa.M0120	M0120	0.76	$y = 25.22 + 0.73x$
tmpa.M5027	M5027	0.79	$y = 22.73 + 0.79x$
tmpa.M5077	M5077	0.72	$y = 14.56 + 0.8x$

ELABORADO POR: Christian Díaz

Mediante este método se pudo rellenar 72 estaciones empleando las estimaciones del producto satelital. Además al existir una amplio período de información (1998-2016) por parte del producto TMPA v7 permite rellenar una estación en su totalidad, siempre y cuando exista correlación aceptable ( $>0.7$ ).

#### 4.2.1.3 Regresión Lineal Simple con IMERG v3

El relleno para la regresión lineal simple con IMERG v3 se realizó en función de las ecuaciones de la Tabla 4.15 y cuyo coeficiente correlación es mayor a 0.7.

**TABLA 4.15:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con IMERG v3

Y	X	Correlación	Ecuación
JTU.01.PT.42	imerg_JTU.01.PT.42	0.79	$y = -53.56 + 0.96x$
JTU.01.PT.52	imerg_JTU.01.PT.52	0.88	$y = -193.47 + 2.29x$
LLO.01.PO.01	imerg_LLO.01.PO.01	0.90	$y = -73.43 + 1.28x$
LLO.01.PO.02	imerg_LLO.01.PO.02	0.83	$y = -53.55 + 1.16x$
LLO.02.PO.01	imerg_LLO.02.PO.01	0.82	$y = -49.12 + 1.08x$
LLO.02.PO.02	imerg_LLO.02.PO.02	0.86	$y = -53.8 + 1.17x$
M0354	imerg_M0354	0.93	$y = -55.77 + 1.36x$

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.15:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con IMERG v3 (cont...)

Y	X	Correlación	Ecuación
P29	imerg_P29	0.85	$y = -18.25 + 0.86x$
P30	imerg_P30	0.84	$y = -25.67 + 0.89x$
BELISARIO	imerg_BELISARIO	0.82	$y = -73.58 + 1.25x$
C04	imerg_C04	1.00	$y = -124.43 + 1.45x$
C05	imerg_C05	0.73	$y = -33.83 + 0.72x$
EL CAMAL	imerg_EL CAMAL	0.90	$y = -74.73 + 1.28x$
GUAMANI	imerg_GUAMANI	0.82	$y = -27.97 + 1.05x$
M0002	imerg_M0002	0.85	$y = -73.9 + 1.09x$
M0024	imerg_M0024	0.90	$y = -96.08 + 1.42x$
M0335	imerg_M0335	0.78	$y = -127.14 + 1.83x$
M0343	imerg_M0343	0.91	$y = -37.88 + 0.55x$
M0345	imerg_M0345	0.83	$y = -40.29 + 0.64x$
M0346	imerg_M0346	0.79	$y = -94.8 + 1.24x$
M0357	imerg_M0357	0.83	$y = -103.01 + 1.64x$
M5031	imerg_M5031	0.75	$y = -54.55 + 0.89x$
M5074	imerg_M5074	0.74	$y = -26.36 + 0.68x$
M5078	imerg_M5078	0.74	$y = -36.45 + 0.67x$
P09	imerg_P09	0.80	$y = -59.5 + 0.94x$
P12	imerg_P12	0.75	$y = -34.37 + 0.81x$
P13	imerg_P13	0.80	$y = -51.93 + 0.85x$
P15	imerg_P15	0.76	$y = -18.43 + 0.73x$
P17	imerg_P17	0.72	$y = -126.79 + 1.58x$
P22	imerg_P22	0.79	$y = -32.66 + 0.65x$
P25	imerg_P25	0.83	$y = -54.87 + 1.4x$
P26	imerg_P26	0.75	$y = -26.93 + 0.77x$
P28	imerg_P28	0.83	$y = -58.82 + 1.16x$
P41	imerg_P41	0.78	$y = -30.76 + 0.47x$
P67	imerg_P67	0.78	$y = -40.08 + 0.78x$
P70	imerg_P70	0.86	$y = -109.7 + 1.38x$
TUMBACO	imerg_TUMBACO	0.78	$y = -39.86 + 0.79x$
C02	imerg_C02	0.72	$y = -25.76 + 0.84x$
CARAPUNGO	imerg_CARAPUNGO	0.84	$y = -34.38 + 0.72x$
COTOCOLLAO	imerg_COTOCOLLAO	0.80	$y = -39.3 + 0.74x$
M0337	imerg_M0337	0.87	$y = -75 + 1.4x$
M0339	imerg_M0339	0.94	$y = -68.08 + 1.7x$
M0358	imerg_M0358	0.87	$y = -38.88 + 0.7x$
M0361	imerg_M0361	0.92	$y = -31.34 + 0.72x$
P03	imerg_P03	0.73	$y = -25.44 + 0.77x$
P31	imerg_P31	0.85	$y = -42.5 + 0.96x$
P58	imerg_P58	0.90	$y = -33.56 + 1.42x$
P59	imerg_P59	0.85	$y = -17.21 + 0.41x$

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.15:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Simple con IMERG v3 (cont...)

Y	X	Correlación	Ecuación
P60	imerg_P60	0.71	$y = -33.79 + 0.74x$
P61	imerg_P61	0.86	$y = -25.94 + 0.47x$
P71	imerg_P71	0.87	$y = -58.37 + 0.91x$
P72	imerg_P72	0.87	$y = -71.93 + 1.15x$
M0009	imerg_M0009	0.94	$y = -46.65 + 0.7x$
M0023	imerg_M0023	0.87	$y = -66.67 + 1.01x$
M0344	imerg_M0344	0.75	$y = -103.27 + 1.16x$
M0359	imerg_M0359	0.76	$y = -142.58 + 1.78x$
M1094	imerg_M1094	0.80	$y = -46.62 + 0.76x$
C11	imerg_C11	0.73	$y = -27.48 + 1.11x$
M0364	imerg_M0364	0.86	$y = -87.8 + 1.88x$
M5026	imerg_M5026	0.76	$y = -26.26 + 0.76x$
M5028	imerg_M5028	0.77	$y = -65.01 + 1.17x$
M5029	imerg_M5029	0.71	$y = -38.81 + 0.72x$
P54	imerg_P54	0.80	$y = -43.17 + 0.75x$
C08	imerg_C08	0.89	$y = -78.82 + 1.42x$
LOS CHILLOS	imerg_LOS_CHILLOS	0.73	$y = -43.31 + 1.19x$
M0003	imerg_M0003	0.89	$y = -59.6 + 1.38x$
M0113	imerg_M0113	0.91	$y = -73.58 + 1.46x$
M5027	imerg_M5027	0.75	$y = -0.3 + 0.72x$
M5077	imerg_M5077	0.73	$y = -13.15 + 0.74x$

ELABORADO POR: Christian Díaz

Mediante este método se pudo rellenar 69 estaciones empleando las estimaciones del producto satelital IMERG v3. Sin embargo, debido a la reciente liberación de información de este producto, únicamente se puede rellenar la información faltante desde el mes de abril de 2014 en adelante.

#### 4.2.1.4 Regresión Lineal Múltiple

El relleno se realizó en función de las ecuaciones de la Tabla 4.16 y cuyo coeficiente correlación es mayor a 0.7.

**TABLA 4.16:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Múltiple

Y	X	Correlación	Ecuación
JTU_01_PT_63	C10,P42,P43,P55	0.77	$y = 3.77 - 0.24x_1 - 0.61x_2 + 1.23x_3 + 0.75x_4$
JTU_01_PT_73	C10,P42,P43,P55	0.81	$y = 11.83 - 0.04x_1 - 0.61x_2 + 1.06x_3 + 0.81x_4$
JTU_01_PT_83	C10,P42,P43,P55	0.75	$y = 1.06 - 0.09x_1 - 0.76x_2 + 1.86x_3 + 0.14x_4$
P64	P44, P46	0.73	$y = 65.4 + 1.03x_1 - 0.18x_2$

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.16:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Múltiple (cont...)

Y	X	Correlación	Ecuación
M0354	P29, P30	0.84	$y = 24.29+0.14x_1+0.8x_2$
GUAMANI	P23, P25	0.91	$y = 0.25+0.48x_1+0.64x_2$
P22	P23, P15	0.76	$y = -0.71+0.14x_1+0.58x_2$
P56	P25, EL CAMAL, P26	0.84	$y = 1.38+0.34x_1-0.02x_2+0.52x_3$
P24	P26,BELISARIO, P12	0.80	$y = 1.08+0.86x_1-0.76x_2+0.72x_3$
P41	M0343, M0345	0.83	$y = 3.71+0.49x_1+0.26x_2$
P45	M0343, M0346	0.87	$y = 6.03+0.07x_1+0.59x_2$
C06	M0346, M0343	0.80	$y = 10.44+0.61x_1+0.1x_2$
P67	P17, P13, M0002	0.85	$y = 19.97-0.23x_1+0.55x_2+0.35x_3$
M5078	P19, M0002	0.89	$y = 3.01+0.16x_1+0.76x_2$
M0114	P13, P19, M0002	0.76	$y = -25.3+1.35x_1-0.93x_2+0.94x_3$
TUMBACO	M0002, P13	0.78	$y = 11.33+0.36x_1+0.28x_2$
P14	C05, M0345, M0024	0.72	$y = 2.78+0.04x_1+0.04x_2+0.34x_3$
P27	P12, M0335	0.79	$y = 25.43+0.34x_1+0.49x_2$
P28	P12, M0335	0.81	$y = 27.57+0.34x_1+0.52x_2$
P10	M0024, BELISARIO	0.79	$y = 4.2+0.65x_1+0.09x_2$
P11	M0357, P08	0.80	$y = 11.4+0.7x_1-0.14x_2$
C04	M0357, P08	0.86	$y = 8.39+0.85x_1-0.16x_2$
P58	M0339	0.93	$y = 14.31+0.82x_1$
P59	M0358, C07	0.87	$y = -10.06+0.41x_1+1.27x_2$
P61	M0337, P60	0.75	$y = 6.96+0.29x_1-0.04x_2$
M1200	P20, C07	0.88	$y = 8.31+0.68x_1+0.05x_2$
P71	CARAPUNGO, COTOCOLLAO	0.93	$y = -3.48+0.46x_1+0.46x_2$
P72	COTOCOLLAO, P03	0.95	$y = 1.37+1.33x_1-0.16x_2$
C03	P03, C02	0.77	$y = 4.72+0.69x_1+0.07x_2$
P05	P03, C02	0.85	$y = 14.69+0.72x_1-0.15x_2$
P31	M0361, C02	0.70	$y = 15.88+0.22x_1+0.56x_2$
P60	M0337	0.88	$y = -0.89+0.69x_1$
P48	P31, M0361	0.77	$y = 21.74+0.15x_1+0.94x_2$
P68	P37, M5021	0.81	$y = 15.59+0.69x_1+0.01x_2$
M5022	M0188, P44	0.82	$y = -31.68+0.32x_1+0.99x_2$
M5023	M0188, P34	0.71	$y = 23.89+0.25x_1+0.23x_2$
P62	P38, P34	0.76	$y = 81.03+1.24x_1+1.34x_2$

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.16:** Ecuaciones mediante el método de Regresión Lineal Múltiple (cont...)

Y	X	Correlación	Ecuación
P65	P38, P34	0.71	$y = 14.25 + 0.75x_1 + 0.06x_2$
M0359	M1094, M0023	0.73	$y = -10.18 + 1.17x_1 + 0.59x_2$
M5076	P39, M0364	0.71	$y = -11.12 + 0.31x_1 + 0.27x_2$
M5026	M0364, P35	0.79	$y = 6.05 + 0.47x_1 + 0.01x_2$
C11	M5028, M0364	0.76	$y = 14.53 + 0.35x_1 + 0.47x_2$
M5030	M0353, C08	0.76	$y = 17.83 + 0.1x_1 + 0.55x_2$
P54	M0353, C08	0.86	$y = 7.3 + 0.17x_1 + 0.39x_2$
M5028	M0353, C08	0.77	$y = 29.34 + 0.28x_1 + 0.28x_2$
M50118	M0003, M0113	0.90	$y = -2.11 + 0.9x_1 + 0.04x_2$
LOS CHILLOS	P17	0.79	$y = 26.66 + 0.79x_1$

ELABORADO POR: Christian Díaz

Mediante la regresión lineal múltiple se pudo rellenar 46 estaciones empleando la información de 2 o 3 estaciones cercanas. Como resultado, en la Tabla 4.17 se determina la cantidad de datos rellenados mediante los métodos de relleno temporales.

**TABLA 4.17:** Cantidad de datos rellenados a nivel mensual mediante métodos temporales

Estación	N° Datos Inicio	Datos Rellenados			
		Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Simple IMERG	Regresión Lineal Múltiple
C09	77	-	-	-	-
C10	103	49	-	-	-
JTU_01.PT_11	26	-	-	6	55
JTU_01.PT_22	28	-	-	6	54
JTU_01.PT_32	27	-	-	7	55
JTU_01.PT_42	26	-	-	9	58
JTU_01.PT_52	13	-	-	19	59
JTU_01.PT_63	31	-	-	5	47
JTU_01.PT_73	29	-	-	5	54
JTU_01.PT_83	28	-	-	6	47
P42	151	-	-	-	-
P43	98	54	-	-	-
P55	87	65	-	-	-
P44	129	-	-	18	-
P46	97	-	-	12	-
P64	63	-	-	-	54
LLO_01.PO_01	27	-	201	21	9
LLO_01.PO_02	34	-	194	12	-
LLO_02.PO_01	36	-	192	11	-
LLO_02.PO_02	37	-	191	11	-

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.17:** Cantidad de datos rellenados mediante métodos temporales (cont...)

Estación	N° Datos Inicio	Datos Rellenados			
		Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Simple IMERG	Regresión Lineal Múltiple
M0354	202	-	-	15	25
P29	170	57	58	-	-
P30	166	61	62	1	-
BELISARIO	155	-	73	-	-
C04	131	82	97	23	50
C05	186	-	41	2	-
C06	165	60	63	-	53
EL CAMAL	131	-	-	22	-
GUAMANI	100	94	128	-	90
M0002	215	-	13	10	-
M0010	33	-	-	-	-
M0024	212	-	14	10	-
M0114	50	119	160	-	104
M0335	207	-	21	8	-
M0341	18	-	206	-	151
M0343	190	-	31	13	-
M0345	184	-	-	9	-
M0346	207	-	21	11	-
M0357	208	-	20	10	-
M5031	67	-	159	5	-
M5074	55	18	-	5	-
M5075	53	-	-	1	-
M5078	55	123	172	5	122
P08	174	-	-	3	-
P09	180	-	48	-	-
P10	121	93	106	-	54
P11	145	68	83	-	40
P12	179	-	49	-	-
P13	176	-	52	7	-
P14	143	-	84	4	29
P15	180	-	48	-	-
P17	160	-	68	13	-
P19	176	-	-	4	-
P21	66	-	-	-	92
P22	127	-	-	1	50
P23	153	-	75	-	-
P24	27	-	-	-	103

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.17:** Cantidad de datos rellenados mediante métodos temporales (cont...)

Estación	N° Datos Inicio	Datos Rellenados			
		Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Simple IMERG	Regresión Lineal Múltiple
P25	196	-	-	-	-
P26	144	-	84	-	-
P27	155	32	73	-	32
P28	155	31	73	-	31
P33	61	-	-	-	-
P41	97	114	130	-	95
P45	118	89	110	7	87
P52	96	-	-	-	83
P56	69	127	159	3	70
P63	58	-	-	1	-
P67	39	-	189	6	127
P70	11	-	179	17	-
TUMBACO	153	-	75	1	40
C02	166	-	62	-	-
C03	50	-	173	-	120
C07	176	-	52	-	-
CARAPUNGO	156	-	72	-	-
COTOCOLLAO	156	-	72	-	-
M0337	211	-	16	10	-
M0339	212	-	16	9	-
M0358	206	-	21	8	-
M0361	197	-	31	19	-
M1200	49	167	167	-	156
P03	181	-	47	1	-
P05	38	-	188	-	128
P20	186	-	42	-	-
P31	146	-	-	3	32
P58	59	163	169	1	163
P59	70	139	-	5	81
P60	65	-	159	6	152
P61	50	166	177	6	15
P71	10	128	214	19	130
P72	10	140	-	20	132
P32	35	-	-	-	101
P48	104	-	124	-	47
C13	14	-	-	10	-
M5021	108	-	-	3	-

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

**TABLA 4.17:** Cantidad de datos rellenados mediante métodos temporales (cont...)

Estación	N° Datos Inicio	Datos Rellenados			
		Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Simple IMERG	Regresión Lineal Múltiple
P37	129	-	-	1	-
P68	60	87	-	-	51
M0188	149	-	-	8	-
M5022	76	92	-	-	67
M5023	71	-	-	1	80
M5024	74	-	-	-	-
M5025	84	-	-	3	-
P34	160	-	-	-	-
P62	72	-	-	-	62
P65	61	79	-	-	73
M0009	205	-	21	14	-
M0023	184	-	44	12	-
M0111	93	-	127	-	-
M0344	118	-	-	14	-
M0359	171	-	-	12	35
M1094	216	-	11	9	-
C11	57	-	-	8	26
M0364	208	-	20	10	-
M5026	99	117	-	6	51
M5028	80	116	148	6	69
M5029	72	-	-	5	-
M5030	77	-	-	3	73
M5076	54	-	-	4	88
P35	107	-	-	-	-
P39	144	-	-	1	-
P54	82	113	-	6	67
P38	130	-	-	8	-
C08	154	-	74	9	-
LOS CHILLOS	149	33	79	3	33
M0003	216	-	12	12	-
M0113	205	-	23	12	-
M0118	27	189	201	-	180
M0120	159	-	69	-	-
M0353	181	-	-	7	-
M5027	95	-	133	9	-
M5077	52	-	176	6	54
C01	128	-	-	4	27

Sigue en la siguiente página

(Viene de la página anterior)

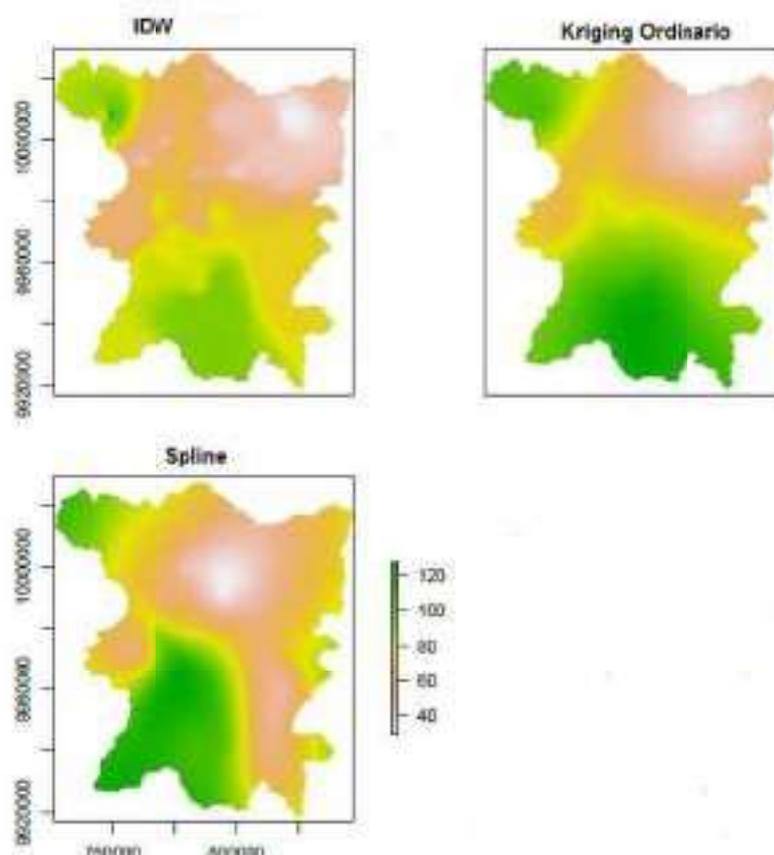
**TABLA 4.17:** Cantidad de datos rellenados mediante métodos temporales (cont...)

Estación	N° Datos Inicio	Datos Rellenados			
		Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Simple IMERG	Regresión Lineal Múltiple

ELABORADO POR: Christian Díaz

## 4.2.2 MÉTODOS DE RELLENO ESPACIALES

De acuerdo con las metodologías detalladas en el Capítulo 3, se realizó el respectivo relleno. Debido a los faltantes de información, se aplicó un proceso de relleno mensual considerando todas estaciones vecinas a través de la metodología de interpolación espacial IDW (Inverse Distance Weighted), Kriging Ordinario y Spline Line. A continuación, se puede ver la diferencia entre cada uno de los métodos espaciales aplicados para el mes de abril de 2005 (Figura 4.9). Con estos métodos, se interpola las estaciones con información mediante las distintas técnicas espaciales (IDW, Kriging y Spline) y se extrae el valor para la estación con información faltante según su ubicación.

**FIGURA 4.9:** Comparación entre los métodos de relleno espaciales (abril-2005)

ELABORADO POR: Christian Díaz

Se presenta la información de precipitación como media mensual multianual, solo con 12 valores de precipitación para cada estación. Se tiene la precipitación media mensual mul-

tianual de las observaciones de campo, en series rellenadas por los distintos métodos de relleno espaciales. Como ejemplo, el resultado del relleno empleando "Spline" se presenta en la Tabla 4.18:

**TABLA 4.18:** Media mensual de precipitación producto del Relleno Spline (*mm/mes*)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C09	74.1	82.5	93.3	117.9	109.1	113.4	84.9	60.6	68.0	89.1	82.4	83.9
C10	84.2	85.2	114.7	120.2	108.4	115.3	82.7	62.4	67.5	94.8	89.8	88.2
P42	94.9	96.6	132.6	147.1	142.1	162.4	138.0	96.9	98.0	110.0	105.4	102.7
P43	85.5	80.2	114.1	116.7	117.9	116.6	86.8	62.0	70.6	86.6	90.3	85.1
P55	84.4	80.2	111.5	118.6	112.3	111.2	84.0	60.9	67.8	90.7	87.8	89.0
P44	93.2	110.0	142.8	154.5	168.5	210.6	172.2	117.3	111.5	102.0	86.8	100.4
P46	80.4	96.6	121.5	145.1	152.7	180.3	126.4	108.7	103.7	96.2	86.8	110.2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LOS CHILLOS	121.1	109.5	144.8	171.7	115.5	47.7	20.8	22.3	64.9	133.9	123.3	112.9
M0003	133.4	156.4	195.0	201.6	152.5	65.9	37.0	36.6	71.7	131.2	145.7	139.9
M0113	146.9	153.2	174.8	166.9	133.3	55.2	30.9	29.0	59.5	116.0	123.8	145.9
M0118	129.2	145.2	179.0	187.0	128.5	58.3	29.7	30.7	63.1	126.4	131.3	137.0
M0120	107.7	124.3	146.3	152.3	126.2	62.4	35.0	26.5	82.7	97.1	112.7	123.3
M0353	212.1	263.8	308.8	251.7	181.9	85.1	35.9	44.7	52.8	132.4	153.2	188.9
M5027	116.3	138.7	159.2	169.7	131.0	62.8	38.1	24.0	54.8	106.1	118.8	127.5
M5077	124.9	149.5	174.5	171.7	130.4	66.0	32.5	29.0	56.6	115.5	126.7	133.3
C01	98.5	100.8	118.6	122.7	121.0	99.6	59.0	58.4	72.5	96.7	97.5	103.0

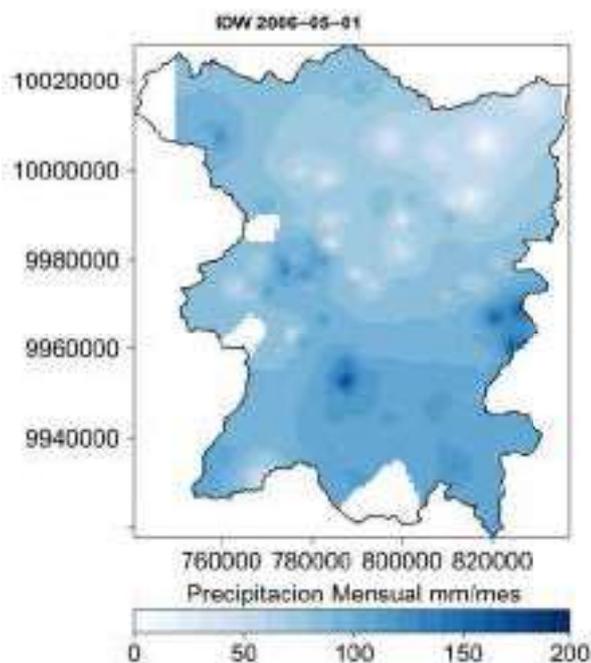
ELABORADO POR: Christian Díaz

Mediante los métodos de relleno espaciales es posible rellenar la información faltante de los pluviómetros para el período 1998-2016 en un 100 % pues se cuenta con información suficiente.

## 4.2.3 RESULTADO DE LA GENERACIÓN DE MAPAS DE PRECIPITACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

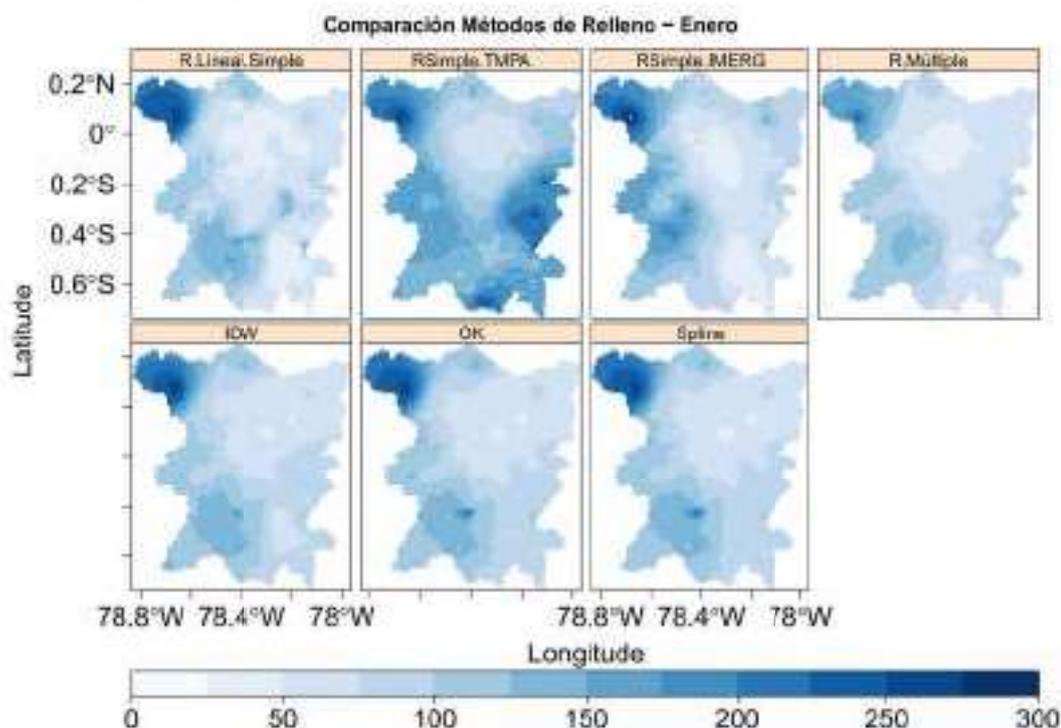
### 4.2.3.1 Interpolación IDW

Como se puede observar en la Figura 4.10, con el método de interpolación IDW se pueden determinar isoyetas o superficies de precipitación a partir de las observaciones de campo. Es conocido para muchos que este tipo de interpolaciones no es confiable porque produce los llamados "ojos de buey" y presenta alta varianza en distancias cortas, pero se empleó debido a la gran cantidad de estaciones presentes en la zona de estudio y una notable concentración en la zona urbana del DMQ.



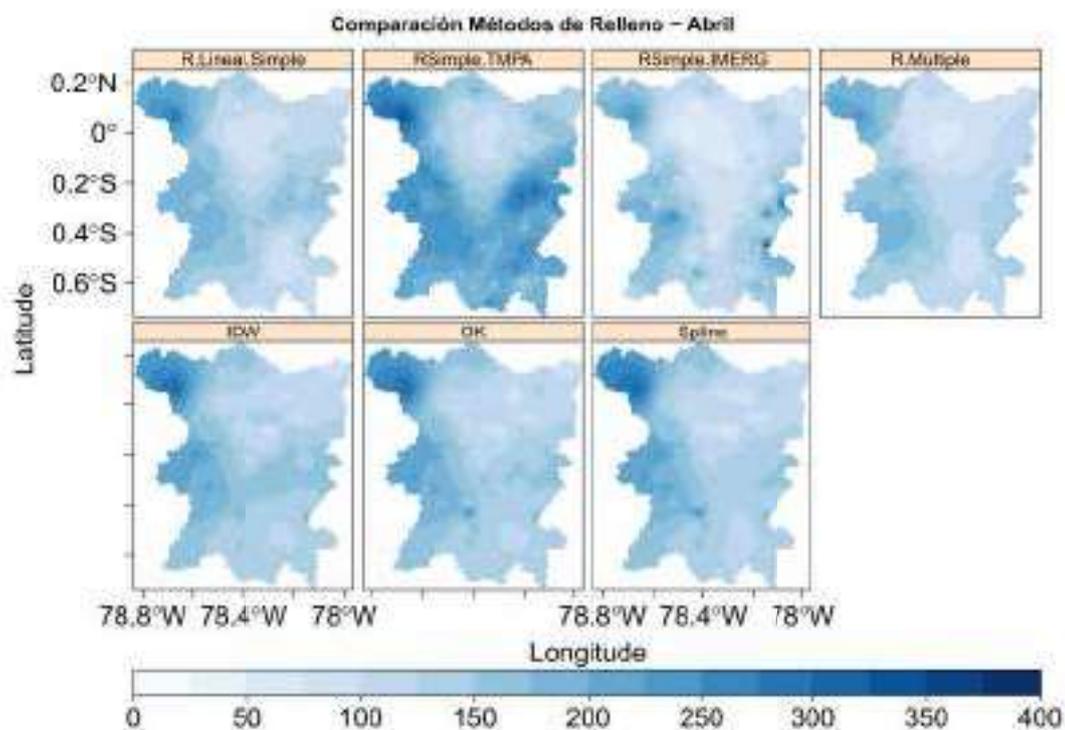
**FIGURA 4.10:** Isoyeta con IDW - datos observados.  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 4.11 se presenta el resultado de la interpolación IDW para los métodos de relleno aplicados al mes de enero. De igual forma, al utilizar IDW existe mayor variabilidad con los métodos de relleno temporales. Sin embargo, existe una mejora para los métodos espaciales al emplear IDW.



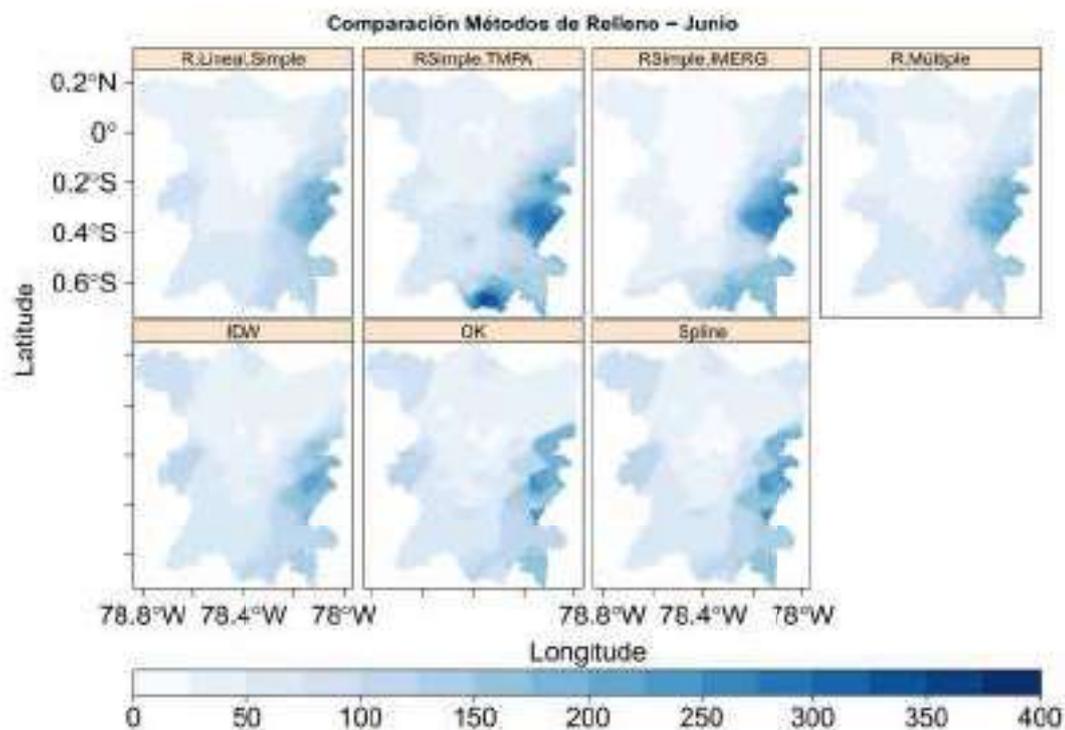
**FIGURA 4.11:** Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de enero con el método de interpolación IDW.

ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.12:** Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de abril con el método de interpolación IDW.

ELABORADO POR: Christian Díaz

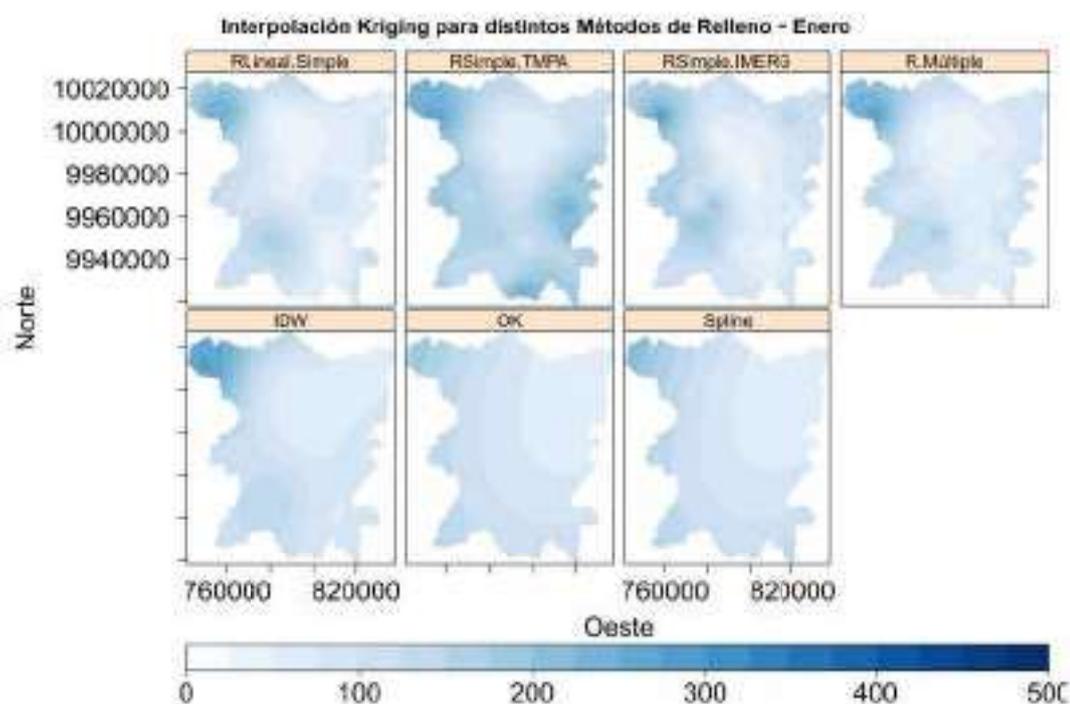


**FIGURA 4.13:** Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de junio con el método de interpolación IDW.

ELABORADO POR: Christian Díaz

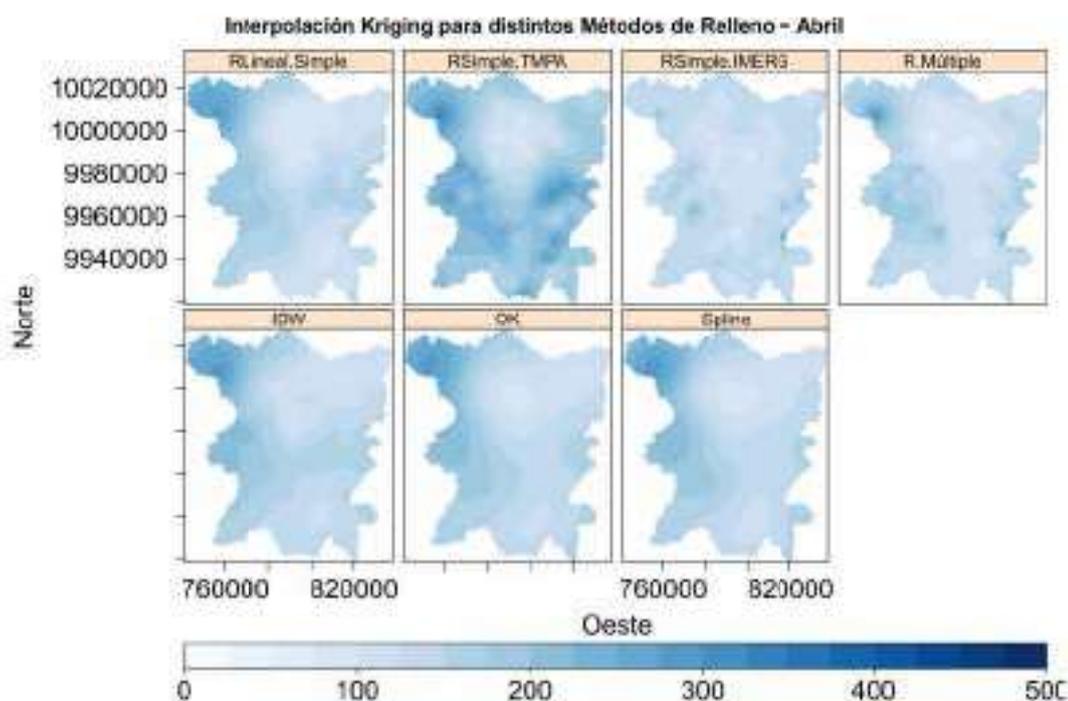
### 4.2.3.2 Interpolación Kriging

En la Figura 4.14 se presenta el resultado de interpolación Kriging para visualizar la sensibilidad de los métodos de relleno. En el caso de la regresión lineal simple y regresión lineal simple con productos satelitales se puede observar que con estos 3 métodos la variabilidad aumenta más rápido con la distancia. En contraste, los métodos de relleno espaciales IDW, OK y spline que son función de la distancia, no presentan la variabilidad a pesar de la complejidad del área estudiada.



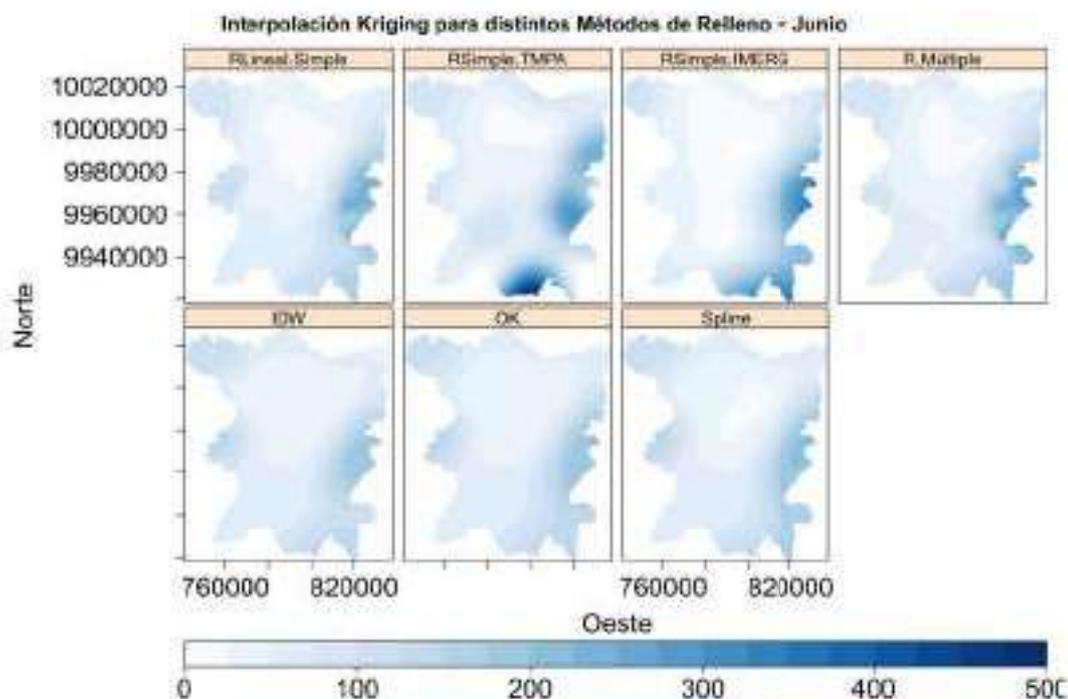
**FIGURA 4.14:** Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de enero con el método de interpolación Kriging

ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.15:** Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de abril con el método de interpolación Kriging.

ELABORADO POR: Christian Díaz



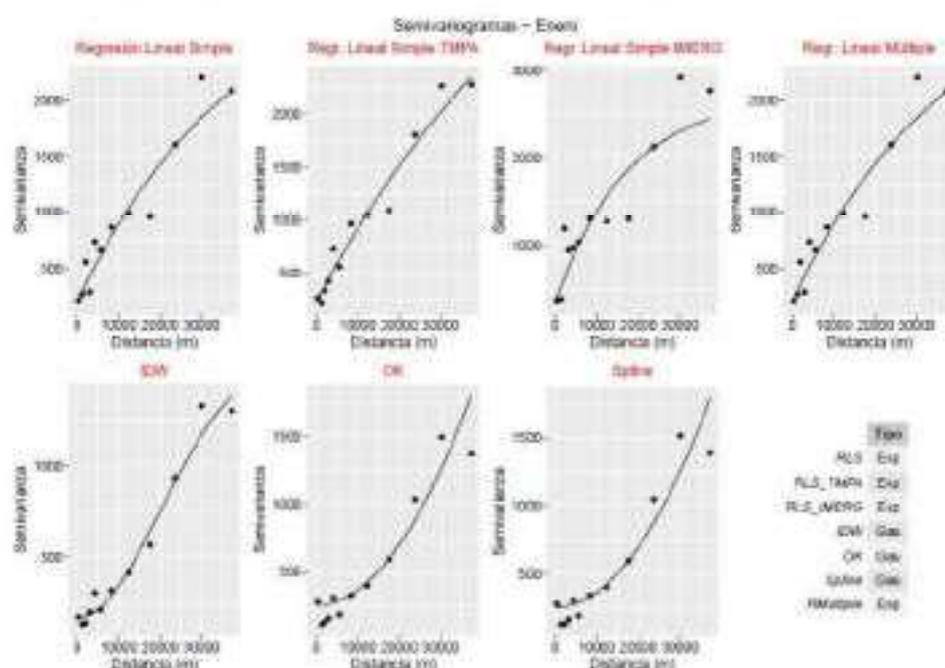
**FIGURA 4.16:** Precipitación media mensual multianual (1998-2016) correspondiente al mes de junio con el método de interpolación Kriging.

ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 4.12 y Figura 4.15 correspondiente a la precipitación de abril se visualiza la

diferencia entre los métodos de interpolación empleados. En el primer caso, con IDW se presenta mayor variabilidad que con Kriging, además que se visualizan los "ojos de buey", lo cual no representa del todo la precipitación observada en la zona. Pero evaluando los métodos de relleno, por ejemplo en la Figura 4.15, nos encontramos con que los métodos temporales (regresión simple) mejoran la captura de la variabilidad de la precipitación independientemente si la regresión se realizó entre las estaciones o empleando los productos satelitales. Si evaluamos los productos satelitales, se puede observar que TMPA v7 es una herramienta útil como complemento en el relleno de la información pluviométrica al igual que IMERG v3.

Adicionalmente se presentan los semivariogramas empleados para la interpolación con Kriging, donde se grafica la varianza vs distancia. Debido a la gran cantidad de estaciones, la gráfica resultaría en una nube de puntos. Sin embargo, el software R estudio realiza un ajuste donde acumula los puntos por grupos para representar el semivariograma más óptimo y se reduce la cantidad de puntos, lo que facilita su interpretación. A continuación se presentan algunos de los semivariogramas (Figura 4.17) correspondientes a la precipitación media mensual multianual del mes de enero con distintos métodos de relleno.



**FIGURA 4.17:** Semivariogramas correspondiente al mes de enero para distintos métodos de relleno.  
ELABORADO POR: Christian Díaz

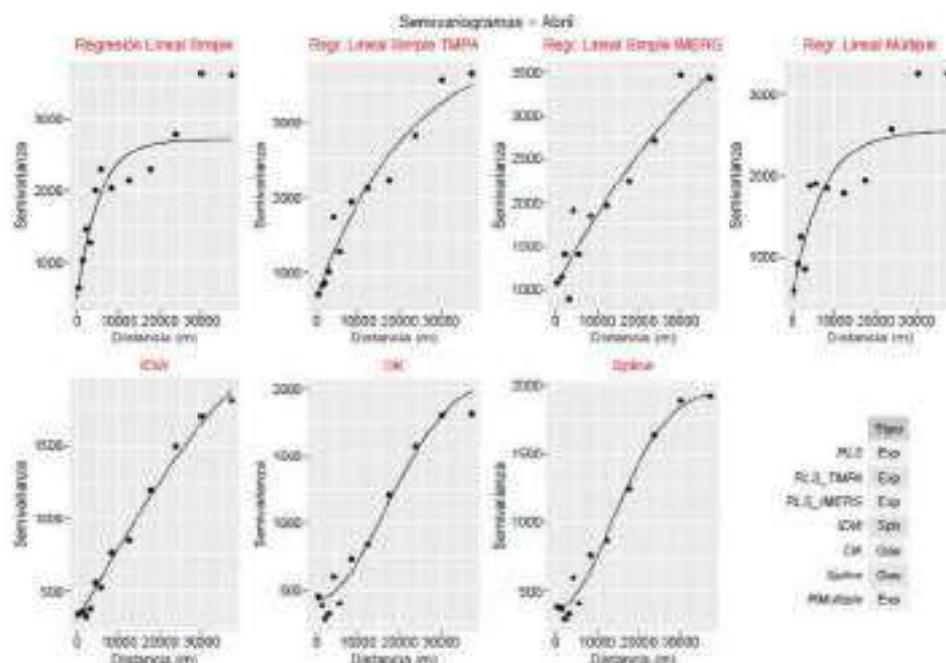


FIGURA 4.18: Semivariogramas correspondiente al mes de abril para distintos métodos de relleno  
ELABORADO POR: Christian Díaz

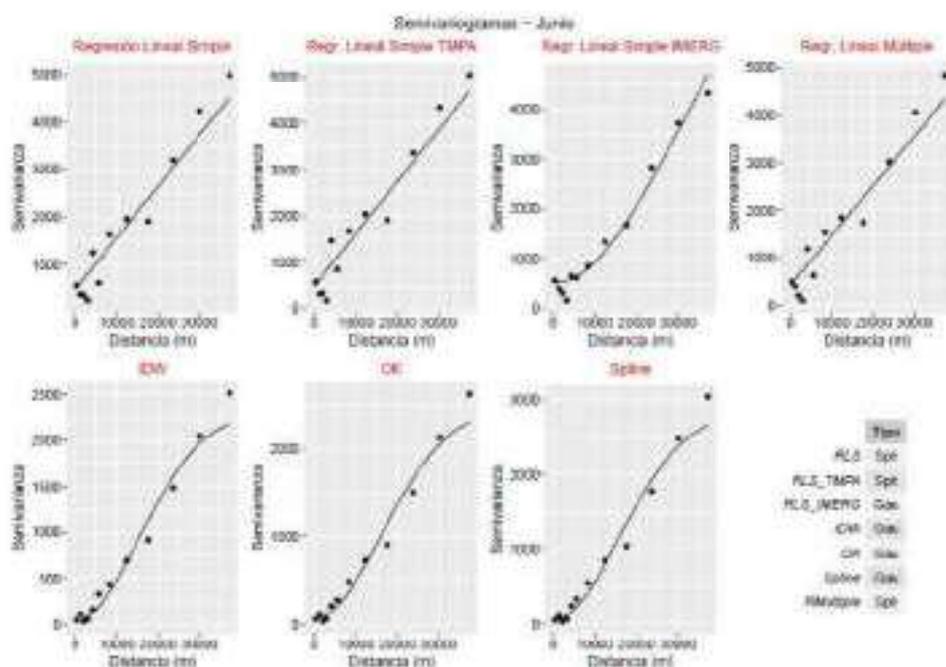


FIGURA 4.19: Semivariogramas correspondiente al mes de junio para distintos métodos de relleno  
ELABORADO POR: Christian Díaz

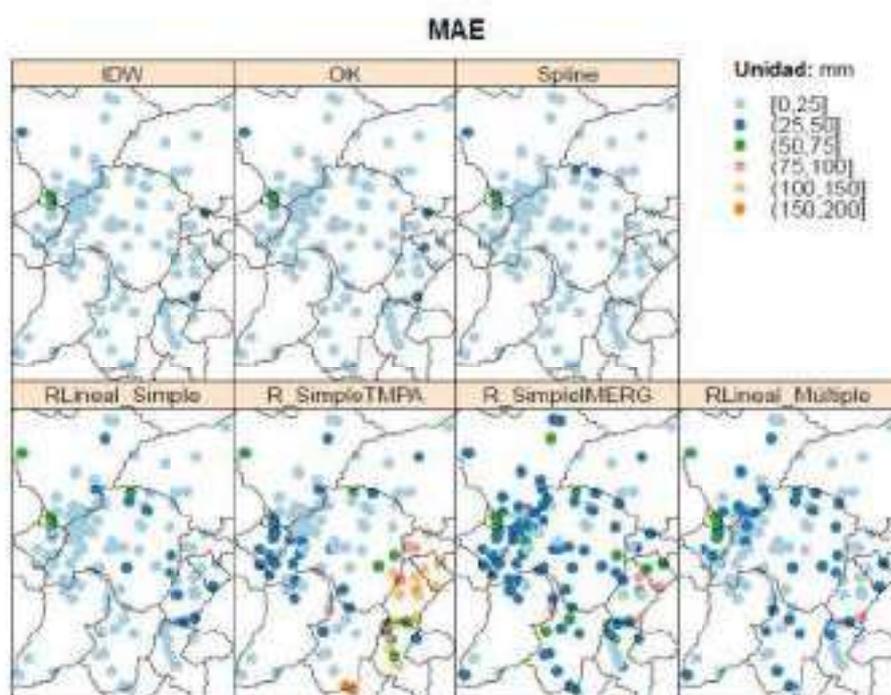
En la Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19 se visualiza la diferencia entre los modelos de semivariogramas empleados. En el caso de los métodos de relleno espaciales se tiene que el modelo más empleado es el Gaussiano (Gau), siendo Kriging el método de relleno con una varianza que aumenta más lentamente. Los métodos de relleno temporales se ajustan en la mayoría a un modelo de semivariograma de tipo Exponencial (Exp), donde el método de relleno de Regresión Lineal Simple con IMERG presenta el nugget más elevado (1050).

Cabe mencionar que el método de Regresión Lineal Simple y Múltiple presentan un modelo de semivariograma similar debido a que las base rellenadas muestran poca diferencia y alta correlación entre estaciones que están cercanas entre sí.

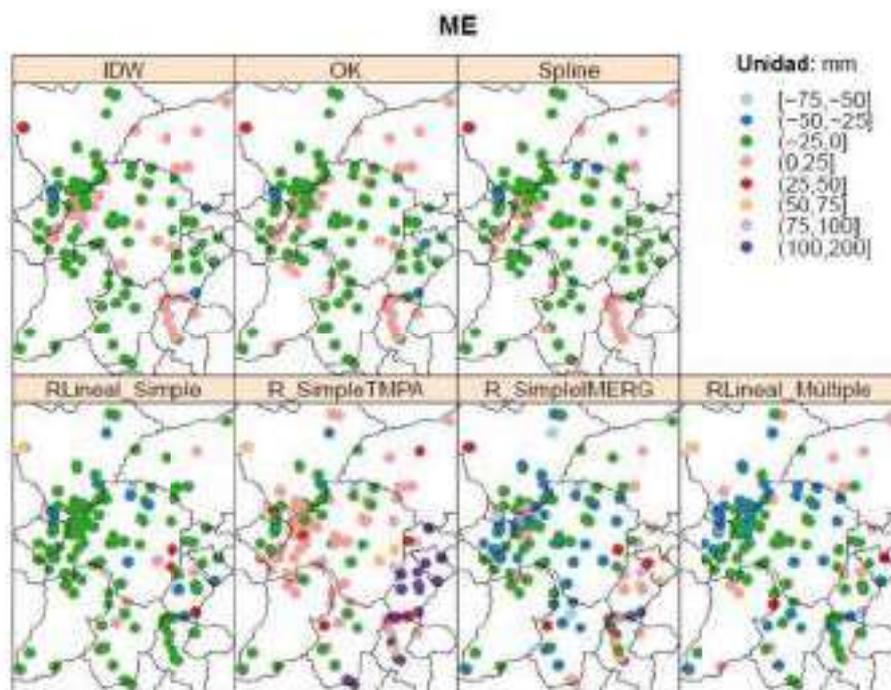
Las imágenes de precipitación media mensual multianual con los distintos métodos de relleno empleando interpolación IDW y Kriging se encuentran en el Anexo 7.

#### 4.2.4 RESULTADO DE LAS MÉTRICAS ESTADÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RELLENO

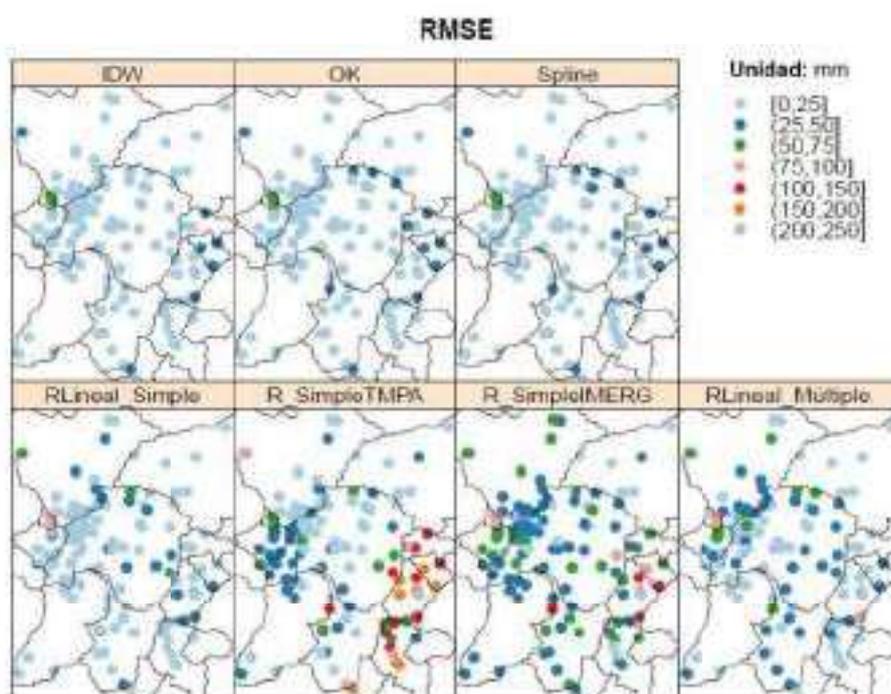
A continuación se presentan las métricas estadísticas para los 7 métodos de relleno empleados, con el fin de determinar el método con menores errores y alta correlación, de manera que represente la climatología de la zona de estudio.



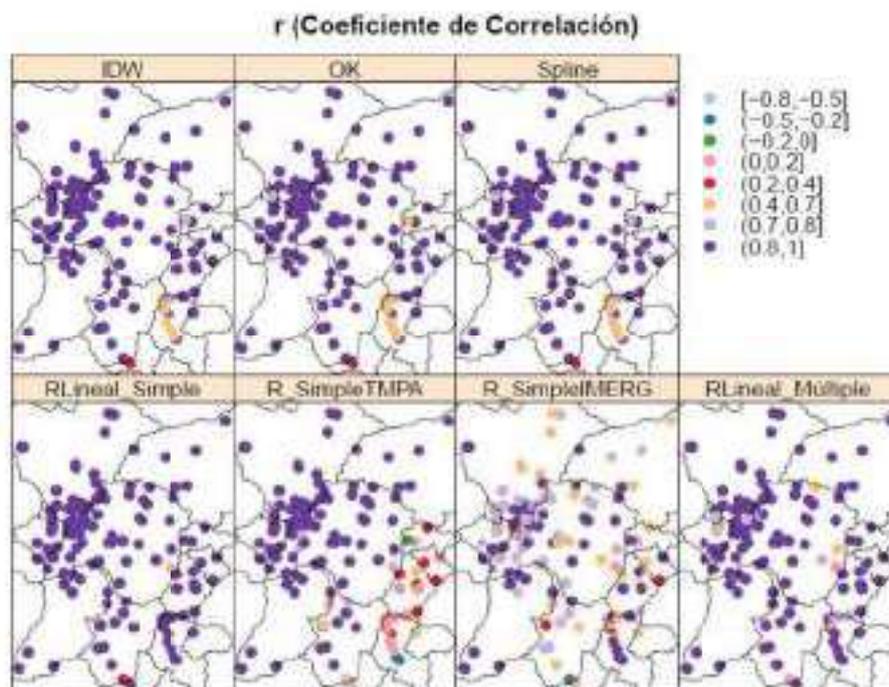
**FIGURA 4.20:** Error Absoluto Medio (MAE) para distintos métodos de relleno  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.21:** Error Medio (ME) para distintos métodos de relleno  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.22:** Error cuadrático medio (RMSE) para distintos métodos de relleno  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.23:** Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para distintos métodos de relleno  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Tabla 4.19 se presenta el resumen de las métricas obtenidas, para determinar el método de relleno que representa la climatología de la zona de estudio. Se visualiza que el método de Regresión Lineal Simple produce menores errores (MAE, ME y RMSE) y la mayor correlación (0.96). Se evidencia que en cuanto a métodos de relleno espaciales, Kriging Ordinario (OK) captura la variabilidad de la precipitación y permiten realizar el relleno porque también presenta menores errores y una alta correlación (0.91), debido a la cantidad de estaciones empleadas (131). Es por ello, que se determina que la base rellena por el método de Regresión Lineal Simple es empleada como base para realizar la corrección de los productos satelitales.

**TABLA 4.19:** Resumen de métricas estadísticas para los métodos de relleno empleados.

Índice	R. Lineal Simple	R.L. Simple TMPA	R.L. Simple IMERG	R.L. Múltiple	OK	IDW	Spline
MAE	19.41	44.66	29.42	22.27	17.62	18.33	18.58
ME	-11.15	27.17	-11.91	-13.35	-2.96	-3.68	-3.38
RMSE	18.11	52.46	45.37	24.04	11.76	13.41	13.13
$r$	0.96	0.69	0.78	0.92	0.91	0.90	0.89

ELABORADO POR: Christian Díaz

Como resultado de los métodos de relleno espaciales y temporales, se determina que mediante el método de regresión lineal simple se obtiene y captura de mejor manera la variabilidad de la precipitación, pues produce los errores más pequeños, en comparación de los métodos espaciales (IDW, OK, y Spline) utilizados. Estos últimos al depender de la distancia no mostraron cambios significativos en gran parte de la zona de estudio. Como por ejemplo en la zona sur del DMQ y la subcuenca de Antisana esta estimación se mantiene constante, donde estudios similares indican que se producen cambios significativos. El método de regresión lineal múltiple le sigue en cuanto a correlación y menores errores, que está acorde debido a correlación que existe para estaciones cercanas entre sí. Se comprueba que

el método de relleno de regresión lineal simple con IMERG produce menores errores y alta correlación (0.78) en comparación con TMPA, pues al tener una mayor resolución capta la variabilidad de la precipitación en las estaciones rellenadas. Entre los métodos de relleno espaciales se detecta que OK (Kriging Ordinario) tiene la correlación más alta (0.91) y errores más pequeños.

### 4.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL

Los datos descargados del producto TMPA- 3B43 v7 e IMERG v3 fueron convertidos a formato raster y se transformaron las unidades de precipitación a *(mm/mes)* para que estén en el mismo formato que las observaciones de campo.

#### RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

Es importante enfatizar que uno de los principales inconvenientes al utilizar un producto satelital es que los valores obtenidos para cada pixel tienen una resolución espacial determinada que limita la estimación. Un ejemplo claro se da en los pluviómetros C09, C10, JTU\_01\_PT\_11 y P55 que por estar cercanos, el satélite reporta valores idénticos para TMPA v7 (Figura 4.24) e IMERG v3 (Figura 4.25), ya que se hallan en el mismo pixel, mientras que los pluviómetros detectan diferencias entre sí, de esta manera los datos pluviométricos muestra la variabilidad de la precipitación. TMPA cuya resolución es  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  capta la precipitación que representa a 7 pluviómetros, mientras que IMERG capta únicamente 4 pluviómetros.

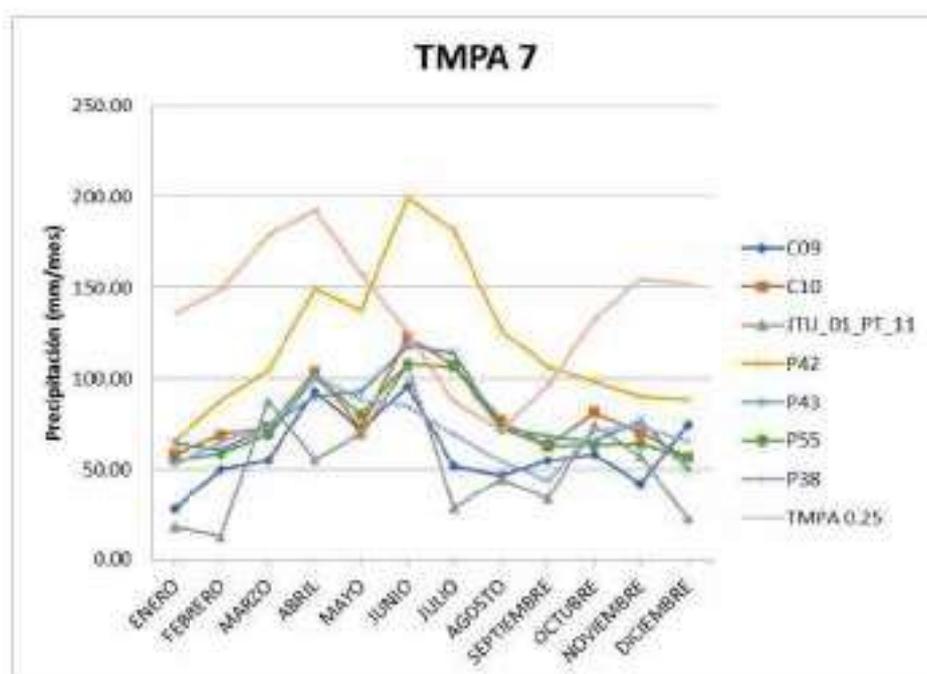
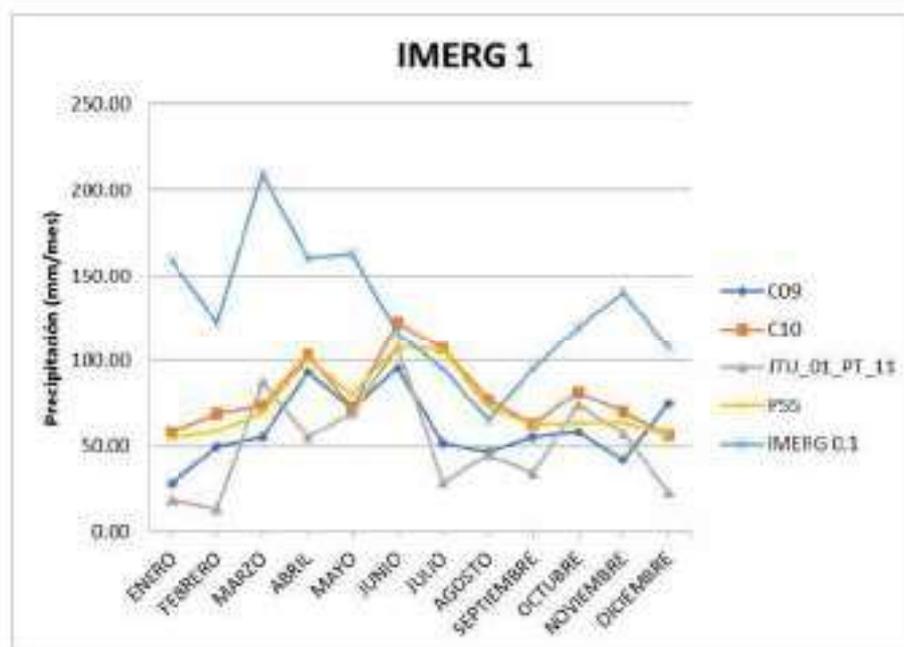
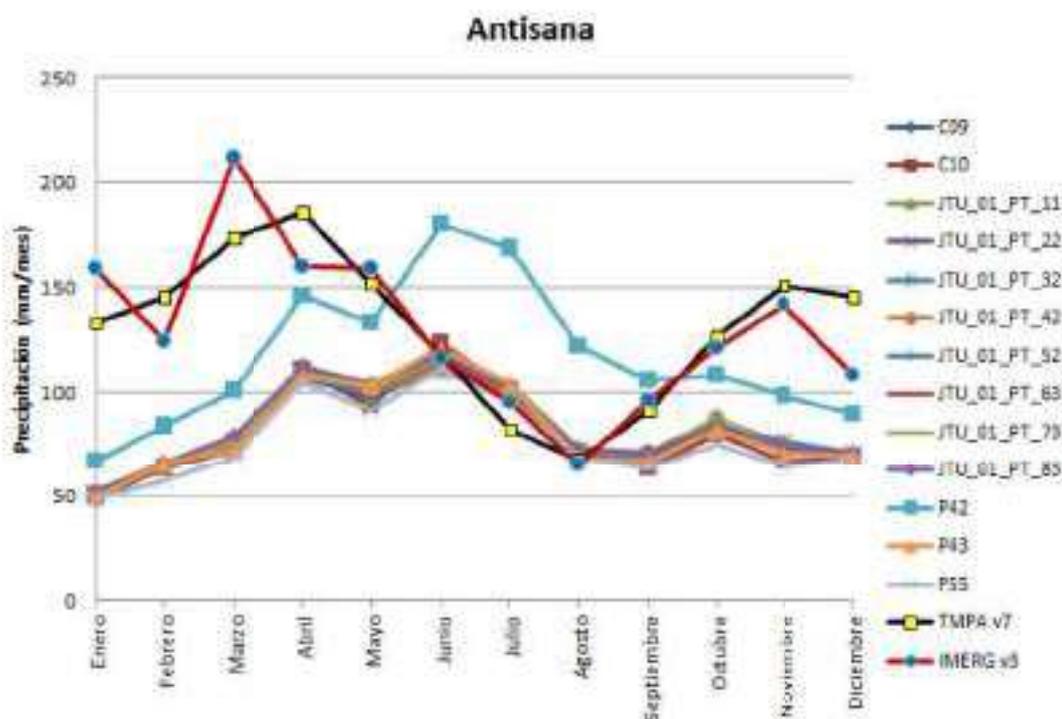


FIGURA 4.24: Estimación satelital TMPA y observaciones de campo del año 2015  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.25:** Estimación satelital IMERG y observaciones de campo del año 2015  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En general, se observa que ambos productos captan la precipitación a nivel cualitativo. Sin embargo, en forma cuantitativa, existen errores y sobreestimación de ambos productos. A continuación se presenta el régimen de precipitación por subcuenca, donde constan los pluviómetros que pertenecen a la subcuenca así como la estimación satelital de IMERG v3 y TMPA v7.

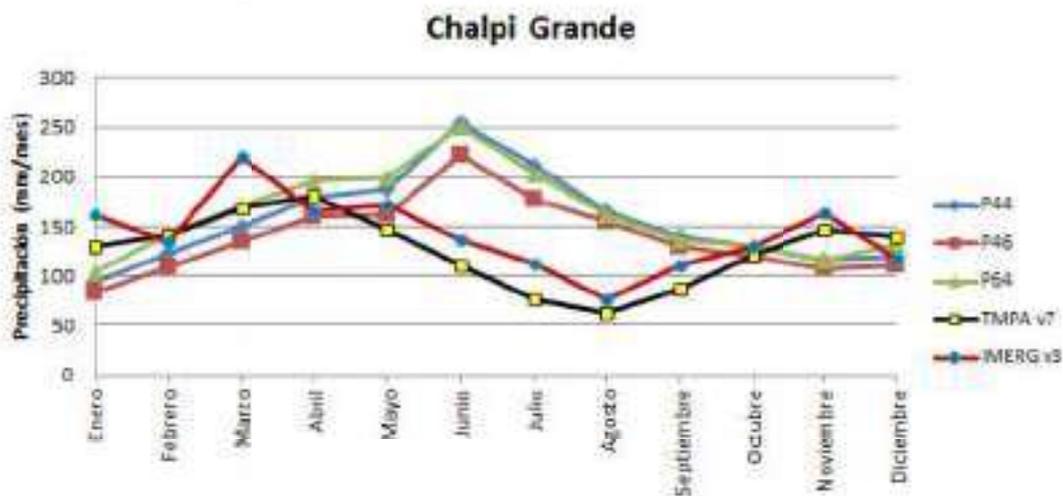


**FIGURA 4.26:** Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Antisana

ELABORADO POR: Christian Díaz

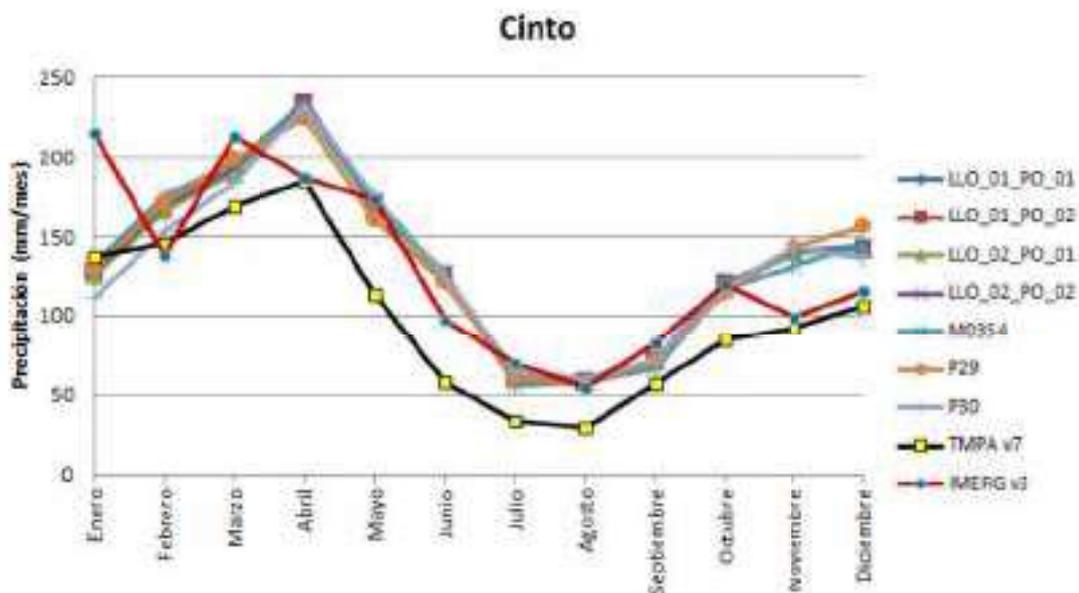
En la Figura 4.26, se puede ver que productos satelitales estiman la precipitación con un régimen bimodal, pero la precipitación observada por los pluviómetros en ésta subcuenca nos permite apreciar un régimen combinado (unimodal y bimodal), conocido como régimen de transición, que está acorde con la climatología para esta zona.

En la subcuenca de Chalpi Grande (Figura 4.27), mediante las observaciones el régimen de precipitación es unimodal, pero las estimaciones satelitales no captan la precipitación en forma cualitativa pues TMPA v7 e IMERG v3 muestran una precipitación de régimen bimodal, además que la subestiman. De la misma manera para las subcuencas de Oyacachi y Papallacta, se puede apreciar que el régimen de precipitación no es capturado por los productos satelitales (Figura 4.30 y Figura 4.31).



**FIGURA 4.27:** Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Chalpi Grande.

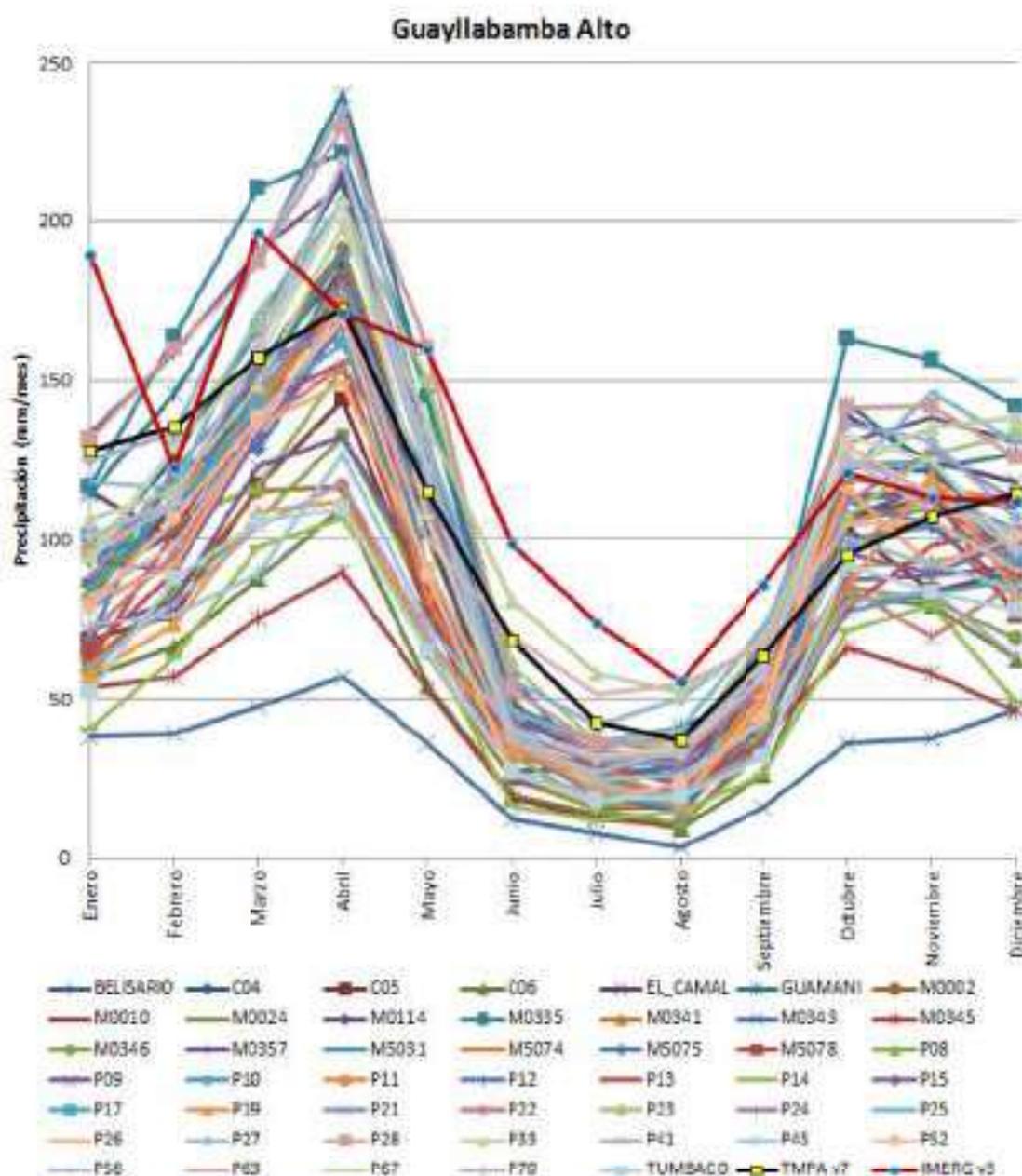
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.28:** Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Cinto.

ELABORADO POR: Christian Díaz

En la subcuenca de Cinto (Figura 4.28) se puede visualizar que ambos productos satelitales representan la precipitación en forma cualitativa. TMPA v7 subestima la precipitación a nivel cuantitativo, mientras que IMERG v3 casi sigue la misma tendencia que las observaciones de los pluviómetros.



**FIGURA 4.29:** Precipitación media mensual multianual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Guayllabamba Alto

ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 4.29, se observa que los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 capturan la precipitación a nivel cualitativo, siguen la tendencia observada por los pluviómetros de la subcuenca de Guayllabamba Alto cuyo régimen es bimodal.

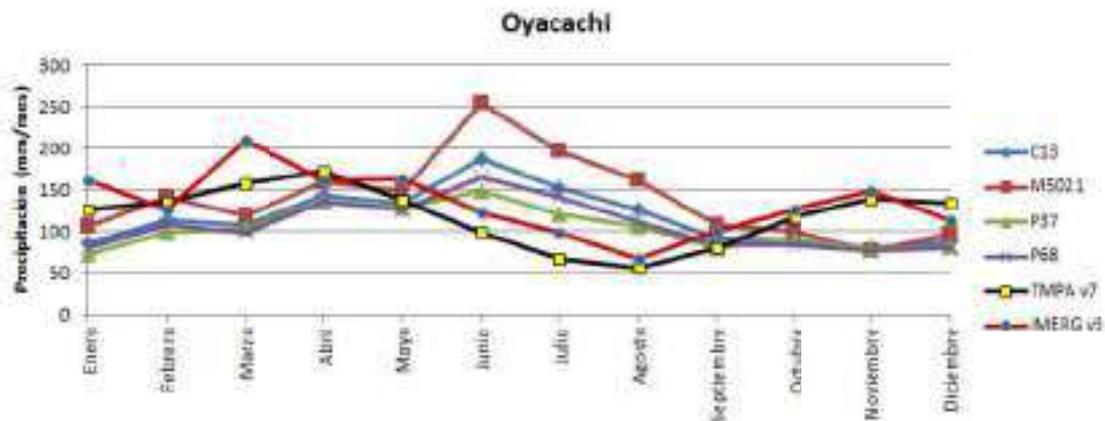


FIGURA 4.30: Precipitación media mensual multiannual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Oyacachi

ELABORADO POR: Christian Díaz

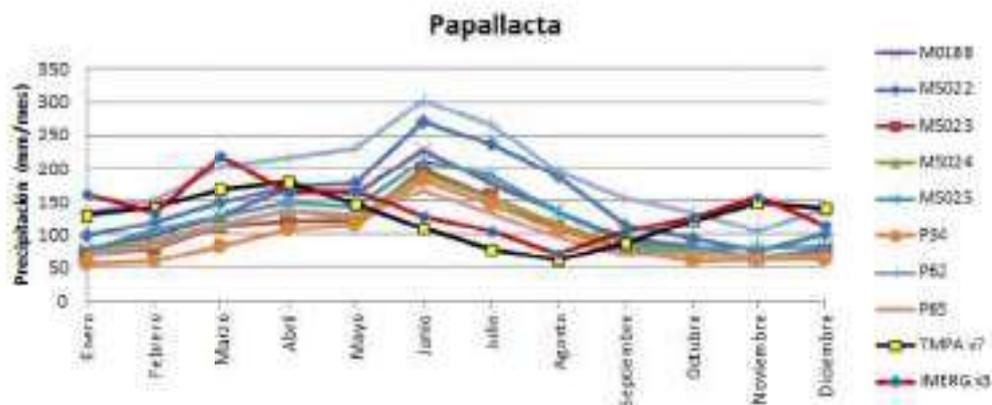


FIGURA 4.31: Precipitación media mensual multiannual de observaciones y productos satelitales en la subcuenca de Papallacta

ELABORADO POR: Christian Díaz

Mediante las observaciones de los pluviómetros se representa la climatología de cada una de las subcuencas de la zona de estudio. Los productos satelitales captan la precipitación cualitativamente para la mayoría de subcuencas, excepto Chalpi Grande, Oyacachi y Papallacta, que en un inicio se conoce que presentan régimen unimodal. El régimen de precipitación del resto de subcuencas se encuentra en el Anexo 3.

### 4.3.1 EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL

Anteriormente se representó el régimen de precipitación de cada subcuenca. En esta sección se calcularon las métricas estadísticas e índices de detección para cada punto donde hay una estación pluviométrica (131 estaciones) y se presenta el resultado por subcuenca.

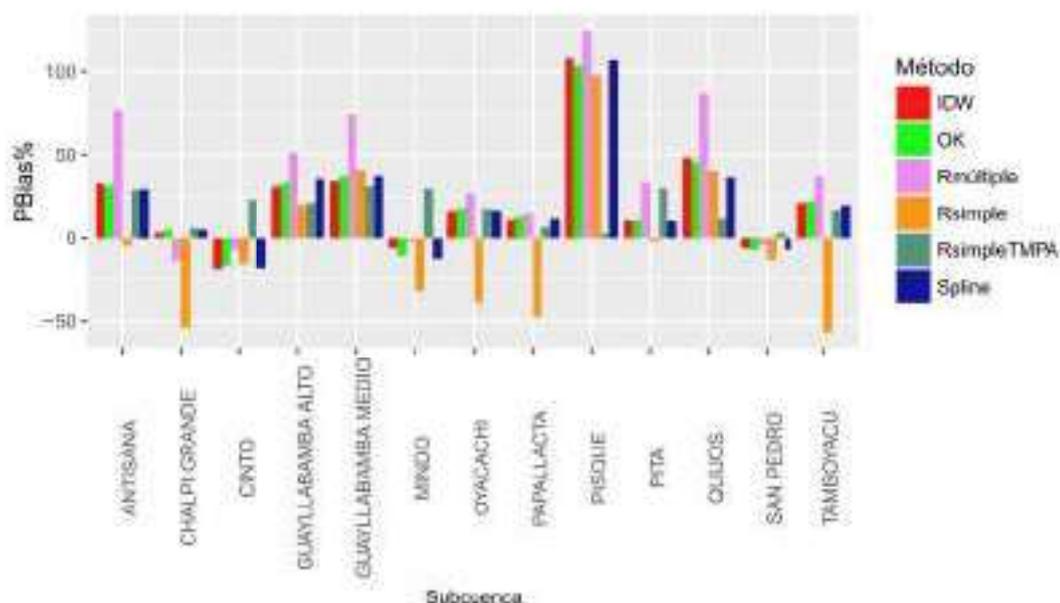
#### 4.3.1.1 Métricas Estadísticas o de intensidad de lluvia

Las métricas estadísticas se presentan como diagrama de barras por subcuenca para las distintas bases rellenas por los diferentes métodos de relleno y también como mapa donde se puede visualizar las estaciones con los errores más significativos y aquellas que tienen alta correlación con respecto a cada producto satelital.

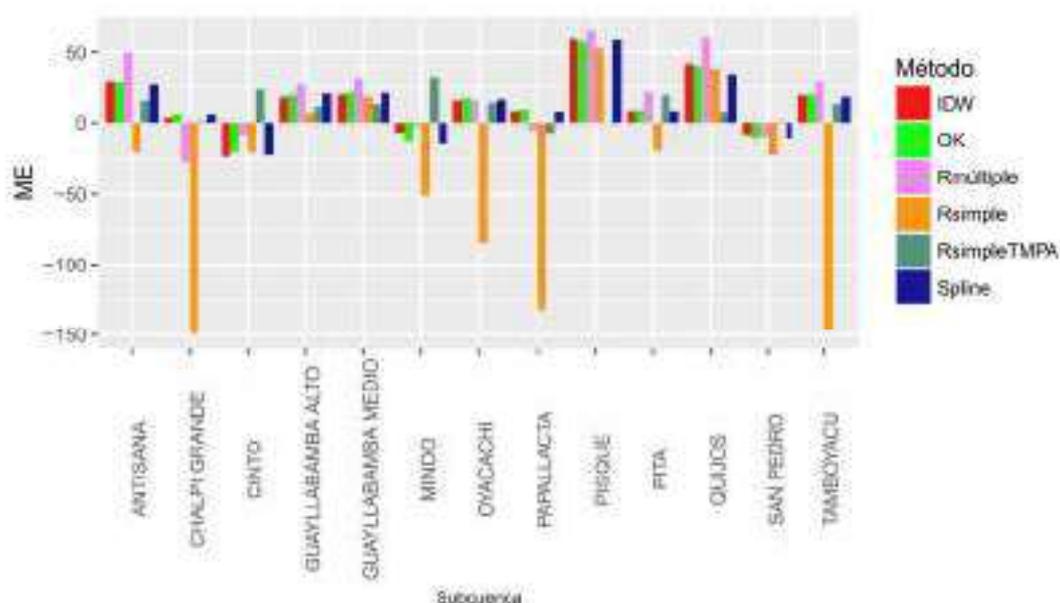
## Métricas Estadísticas TMPA v7

Al comparar los datos rellenados con los métodos temporales (Regresión Lineal Simple y Regresión Lineal Simple con productos satelitales), se observa un sesgo relativamente elevado para la subcuenca de Pisque, Antisana y Quijos. Existen valores elevados de PBias % y ME cuando se realiza la comparación con los datos rellenados con Regresión Lineal Simple y Múltiple para la mayoría de subcuencas (Figura 4.32). Se visualiza que existen errores significativos para las subcuencas de Chalpi Grande, Oyacachi, Papallacta y Tamboyacu, pues desde un inicio se observó que no capturan el régimen de precipitación adecuado. Se presenta una correlación aceptable para todas las subcuencas y en el caso de la regresión lineal simple TMPA se obtienen los valores más altos (0.95) pues como ya se sabe los productos satelitales representan la precipitación cualitativamente para la mayoría de subcuencas.

En general, se observa un sesgo relativamente elevado para cada subcuenca (Figura 4.32). El valor más alto para la cuenca de Pisque fue una sobreestimación (124,72%) y el valor más bajo para la cuenca de Chalpi Grande (3.20%) que además corresponde a una subcuenca pequeña (101.96  $km^2$ ) y posee 3 pluviómetros. La subcuenca de Chalpi Grande y Tamboyacu muestran la mayor subestimación con el método de regresión lineal simple de -54.17% y -54.2%, respectivamente, mientras que Pita indica los valores más bajos de subestimación (-2.42). En cuanto al ME se obtuvo un mínimo de -0.44  $mm$  (subcuenca Pisque) con el método de relleno regresión Lineal Simple con TMPA y un máximo de 65.54  $mm$  para la misma subcuenca con el método de Regresión Lineal Múltiple. Del análisis de sensibilidad de los métodos de relleno se determinó que Regresión Lineal Simple produce valores menores de error medio para todas las subcuencas de estudio, pero al compararlo con el producto TMPA v7, ME alcanza valores muy significativos para las subcuencas Chalpi Grande, Papallacta y Tamboyacu.

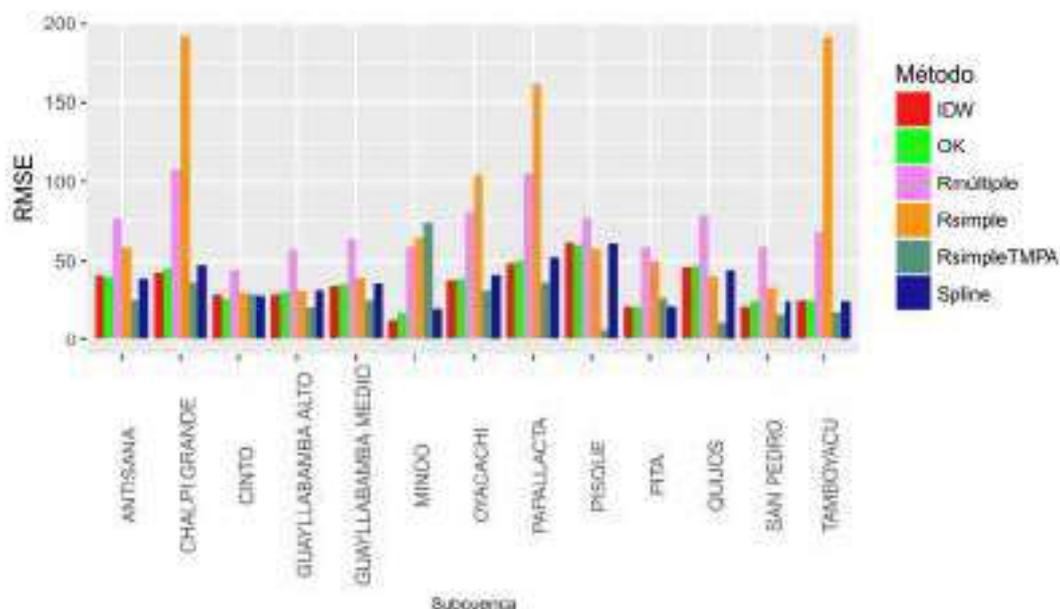


**FIGURA 4.32:** PBias % para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7  
ELABORADO POR: Christian Díaz



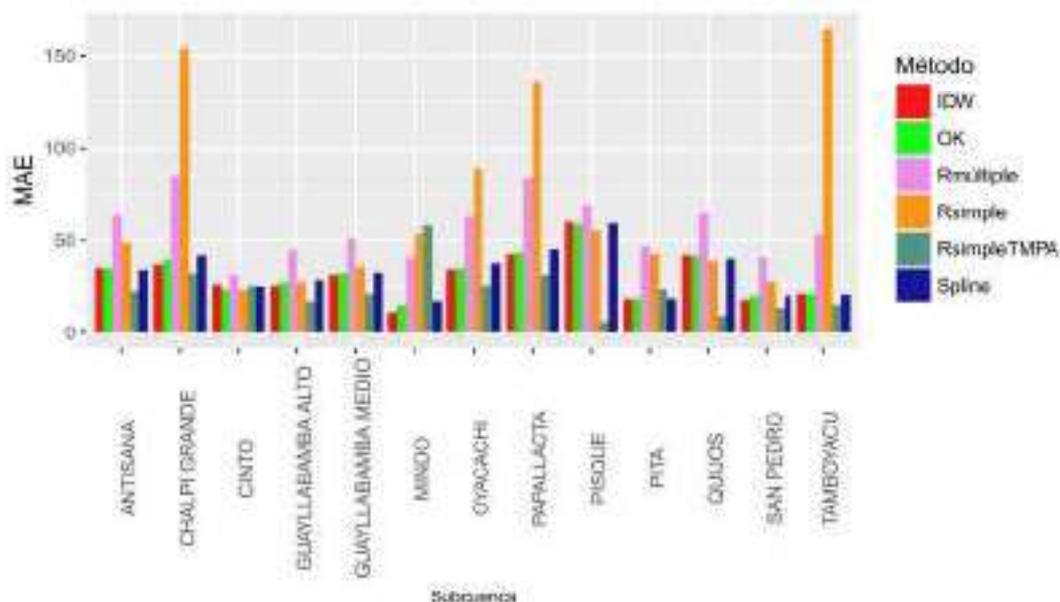
**FIGURA 4.33:** Error medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7  
ELABORADO POR: Christian Díaz

El RMSE con el valor más bajo (11,34) pertenece a la subcuenca de Quijos y un valor máximo (191.71) de la subcuenca de Chalpi Grande. Cabe mencionar que RMSE da énfasis especial a errores en valores extremos ya que eleva el sesgo al cuadrado y al contar con valores RMSE relativos bajos si se compara con el estudio de Castro et al. [2015] indica que los errores son bajos. Es decir el producto satelital está generando estimaciones con errores aceptables. En la zona de estudio, el promedio de RMSE es de 47.75 *mm*. Se observa que el error medio absoluto (MAE) presenta valores bajos (5.72) para la subcuenca de Pisque y los valores máximos (164.88) de la subcuenca de Tamboyacu con el método de regresión lineal simple. Es importante mencionar que los valores de MAE siguen la misma tendencia que RMSE y que son máximos para subcuencas con régimen de precipitación unimodal para los distintos métodos de relleno.



**FIGURA 4.34:** Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

ELABORADO POR: Christian Díaz



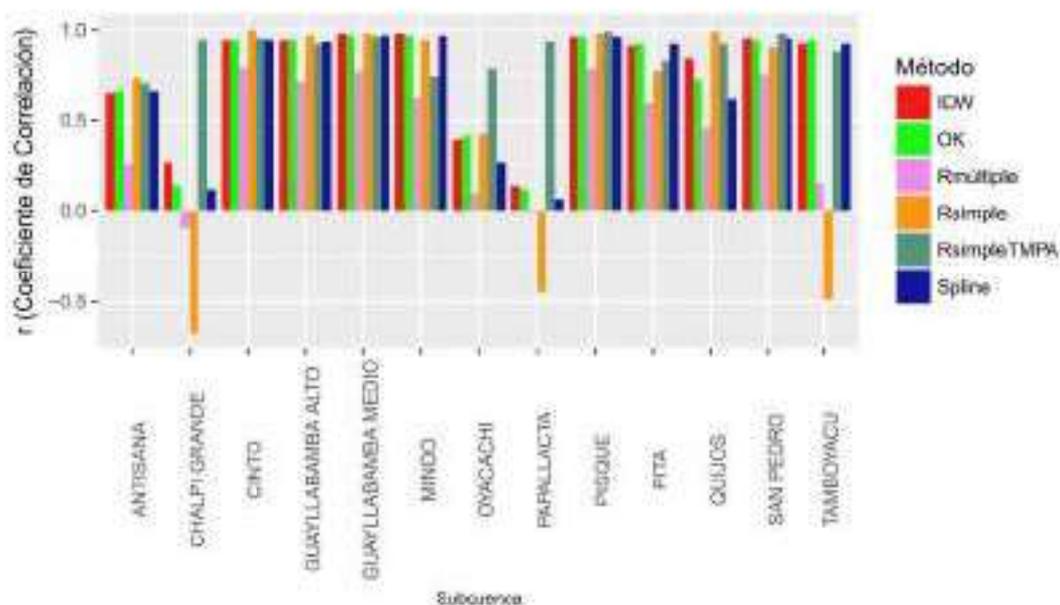
**FIGURA 4.35:** Error medio absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

ELABORADO POR: Christian Díaz

En relación al coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) se obtuvo valores mínimos (-0.45, 0.42) para las subcuencas Papallacta y Oyacachi respectivamente, valores medios entre 0.65 y 0.95 y valores altos (0.92, 0.97, 0.98) de las subcuencas de Cinto y Guayllabamba Medio. En la Figura 4.36 se presentan estos resultados de manera cuantitativa. El análisis del desempeño del producto satelital respecto al coeficiente de Pearson no representa magnitud de los errores, sino la magnitud de la relación entre las estimaciones del satélite y los datos observados por los pluviómetros. El coeficiente de Pearson muestra valores altos

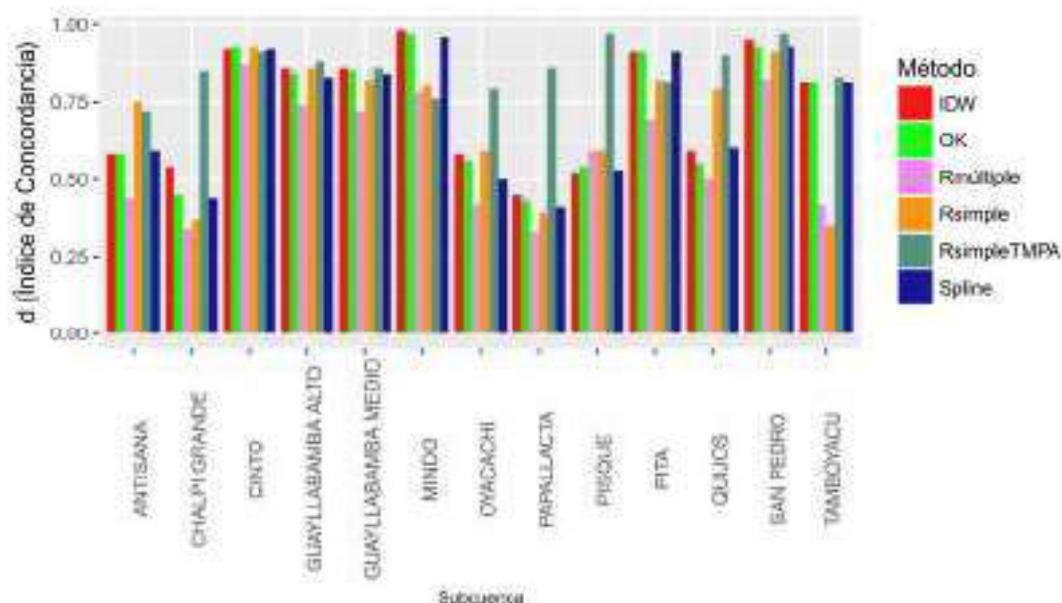
de correlación (mayor a 0.7), excepto para las subcuencas de Chalpi Grande, Papallacta y Tamboyacu, en donde obtienen valores negativos cercanos a -0.5. En promedio para la zona de estudio el valor es de 0.68.

Acerca del índice de concordancia (d) se obtuvo valores mínimos entre 0.3 y 0.5 (Chalpi Grande, Papallacta, Tamboyacu) y valores altos entre 0.86 y 0.98; siendo la subcuenca de Mindo y el Cinto, las que tienen los valores máximos (0.98 y 0.92) con los métodos de relleno espaciales. San Pedro alcanza un valor máximo de 0.97 con el método de regresión lineal simple con TMPA y el Cinto un valor de 0.93 con regresión lineal simple. Se debe notar que los valores de coeficiente de Pearson son similares con este índice (Figura 4.37), proporcionando información concreta sobre la estimación cuantitativa entre el producto y los pluviómetros. El índice de concordancia al ser una medida del grado en el cual las estimaciones satelitales están libres de errores y además, al tener valores altos del índice, indica que el desempeño del satélite es el adecuado para la mayoría de subcuencas. En promedio el valor de índice de concordancia para la zona de estudio es 0.72.



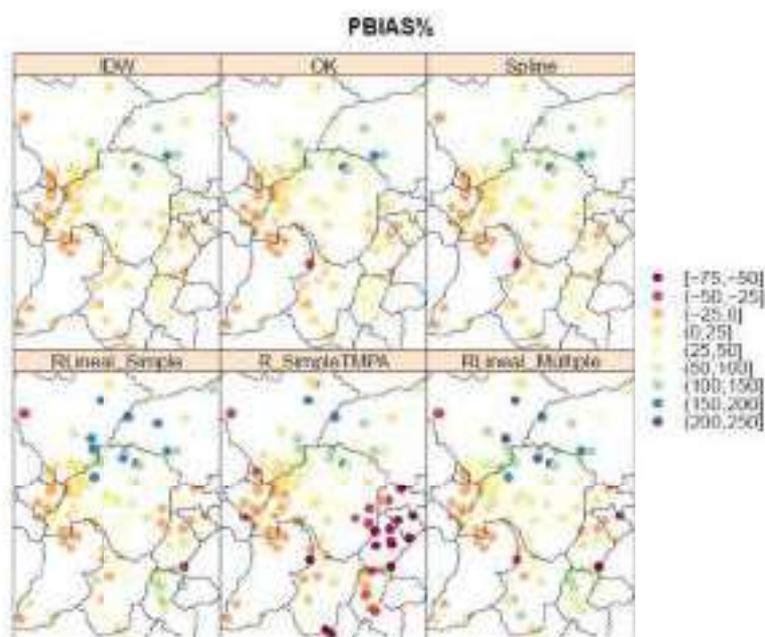
**FIGURA 4.36:** Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

ELABORADO POR: Christian Díaz

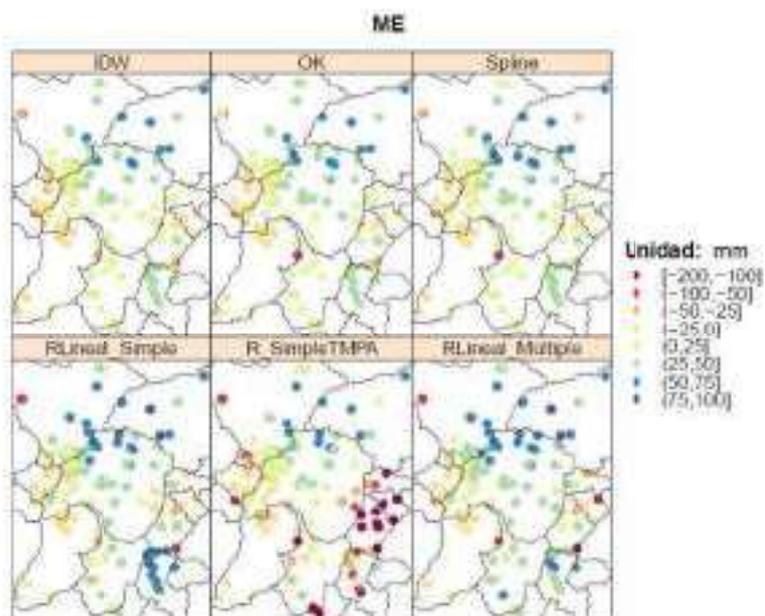


**FIGURA 4.37:** Índice de concordancia (d) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7  
ELABORADO POR: Christian Díaz

También se pueden representar las métricas estadísticas gráficamente (Figura 4.38, Figura 4.39, Figura 4.40, Figura 4.41, Figura 4.42, Figura 4.43) para determinar las zonas donde se producen las zonas con mayores errores estadísticos (PBias %, ME, RMSE, etc.). Se observa que para las subcuencas de Antisana, Chalpi Grande, Papallacta, Oyacachi y Tamboycu, el PBias % presenta valores negativos lo que indica que existe una sub-estimación del satélite.

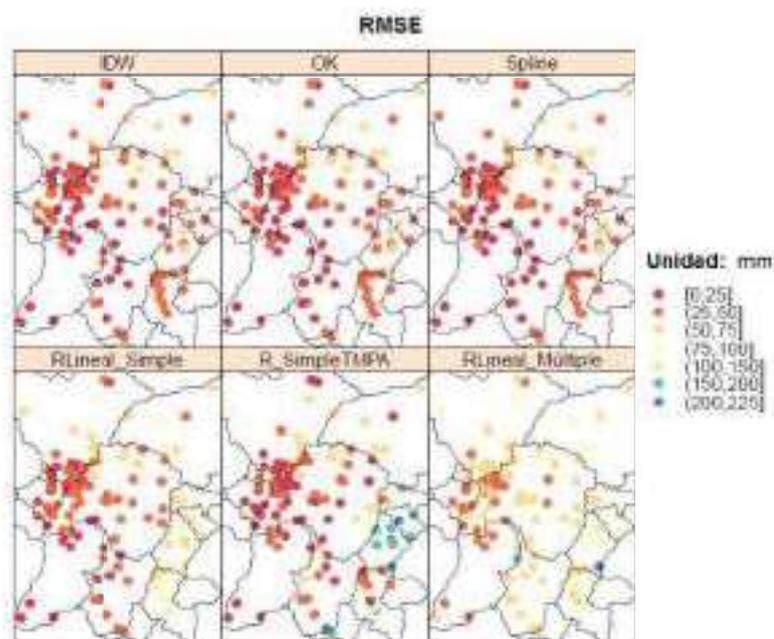


**FIGURA 4.38:** Mapa de PBias % para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7  
ELABORADO POR: Christian Díaz



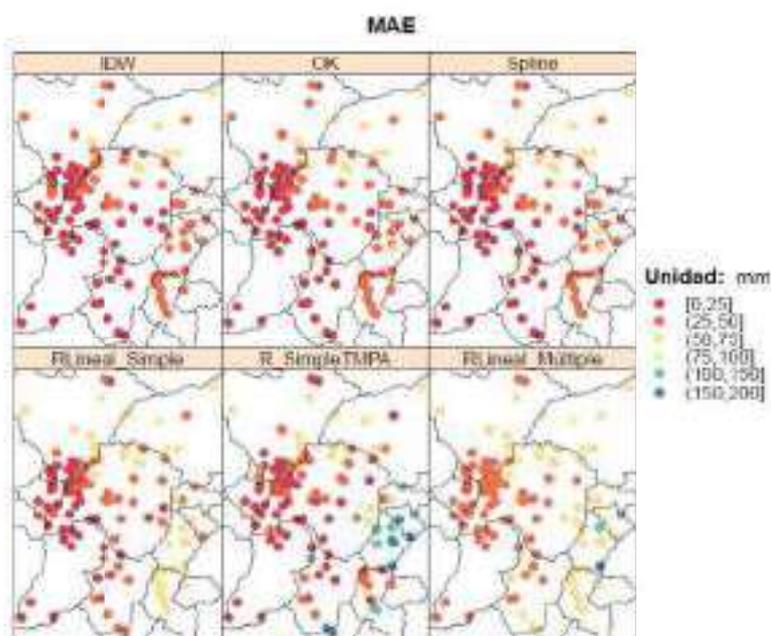
**FIGURA 4.39:** Mapa de Error Medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

ELABORADO POR: Christian Díaz



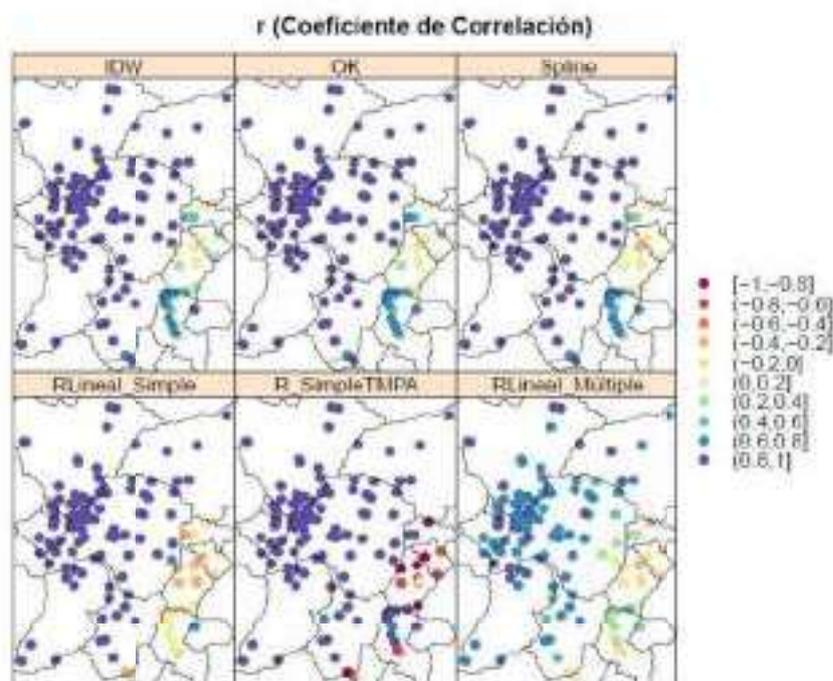
**FIGURA 4.40:** Mapa de Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

ELABORADO POR: Christian Díaz



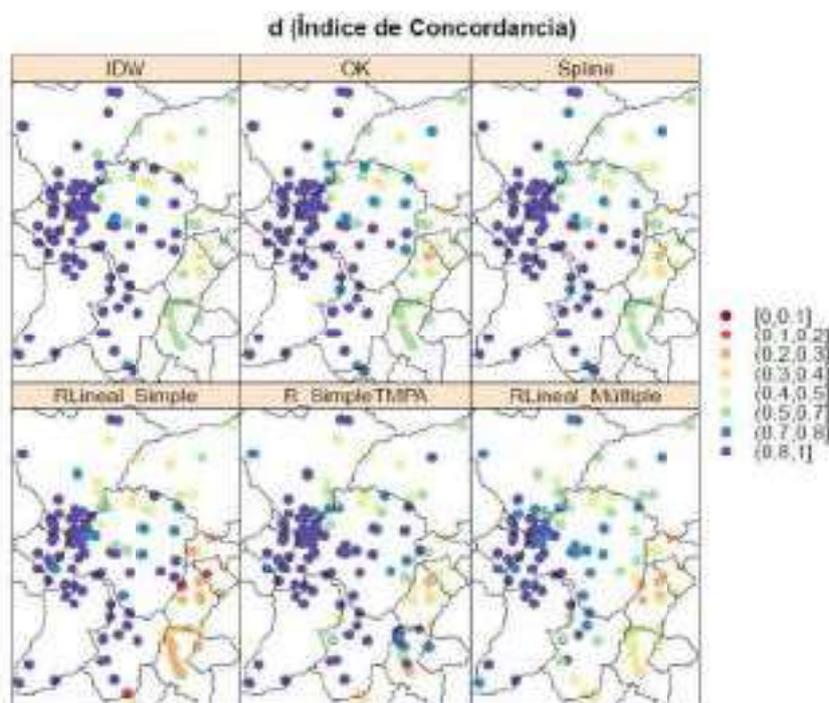
**FIGURA 4.41:** Mapa de Error Medio Absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7.

ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.42:** Mapa de Coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7.

ELABORADO POR: Christian Díaz



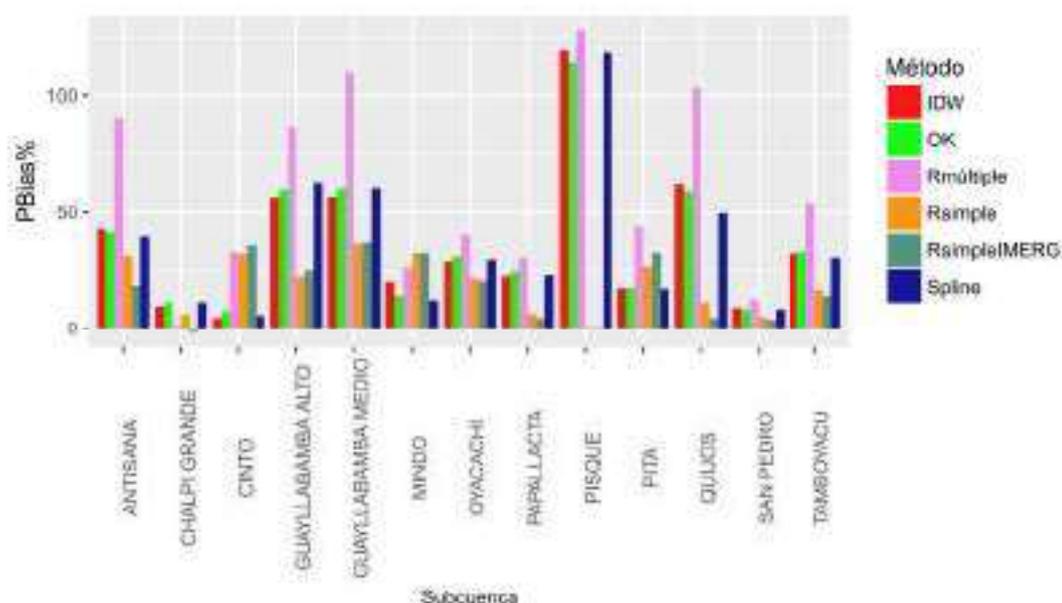
**FIGURA 4.43:** Mapa de Índice de Concordancia (d) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

ELABORADO POR: Christian Díaz

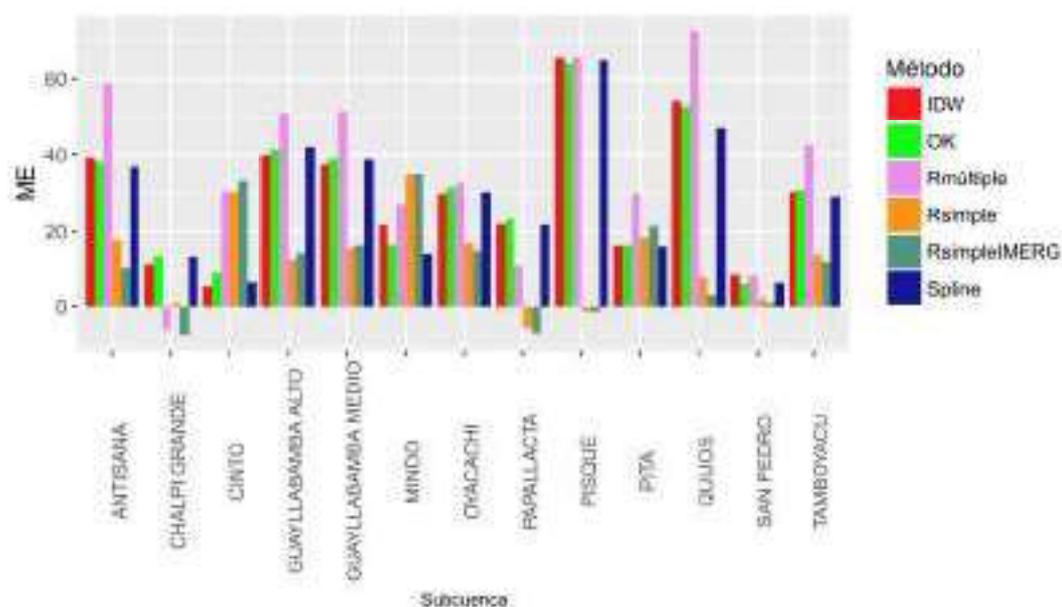
En la Figura 4.42 se observa que la correlación es baja para estaciones pertenecientes a la subcuenca de Antisana, Chalpi Grande, Oyacachi y Papallacta, que como se había mencionado no capturaban el régimen de precipitación y es lógico que presenten los errores más significativos para los diferentes métodos de relleno empleados.

### Métricas Estadísticas IMERG v3

En general, se observa un sesgo relativamente elevado para cada subcuenca (Figura 4.44). El valor más alto para la cuenca de Pisque fue una sobreestimación (127.90%) con el método de regresión lineal múltiple y el valor más bajo para la cuenca de Cinto (4.46%) que además corresponde a una subcuenca pequeña (170.95  $km^2$ ) y posee 7 pluviómetros. El valor promedio de PBIAS % para la zona de estudio es 36.57 para los métodos de relleno espaciales y 31.59 para los métodos de relleno temporales, siendo el método de regresión lineal simple con IMERG el que produce los valores más pequeños. Se observa que el producto satelital IMERG v3 sobreestima la precipitación para la mayoría de subcuencas excepto para Chalpi Grande que obtiene un valor de -1.73% para el método de regresión lineal simple con IMERG. En cuanto al ME se obtuvo un mínimo de 0.89  $mm$  (subcuenca San Pedro) para el método de relleno Regresión Lineal Simple con IMERG y un máximo de 72.54  $mm$  (subcuenca Quijos) con el método de regresión lineal múltiple. Del análisis de sensibilidad de los métodos de relleno se determina que Regresión Lineal Simple produce valores menores de error medio para todas las subcuencas de estudio y en promedio el valor de ME es 12.56 cuando se evalúan con el producto IMERG v3.

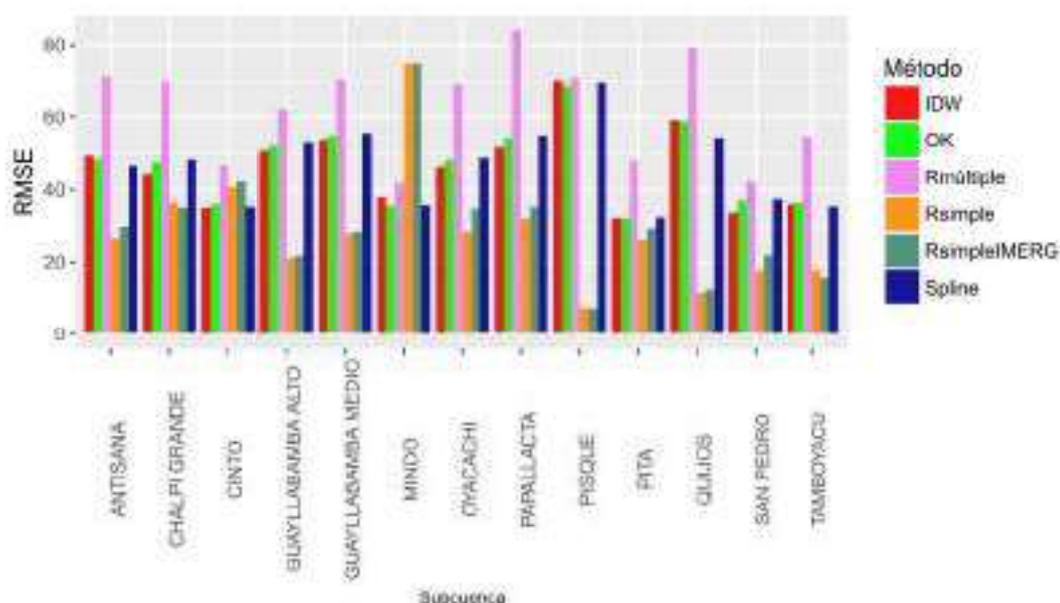


**FIGURA 4.44:** PBias % para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3  
ELABORADO POR: Christian Díaz



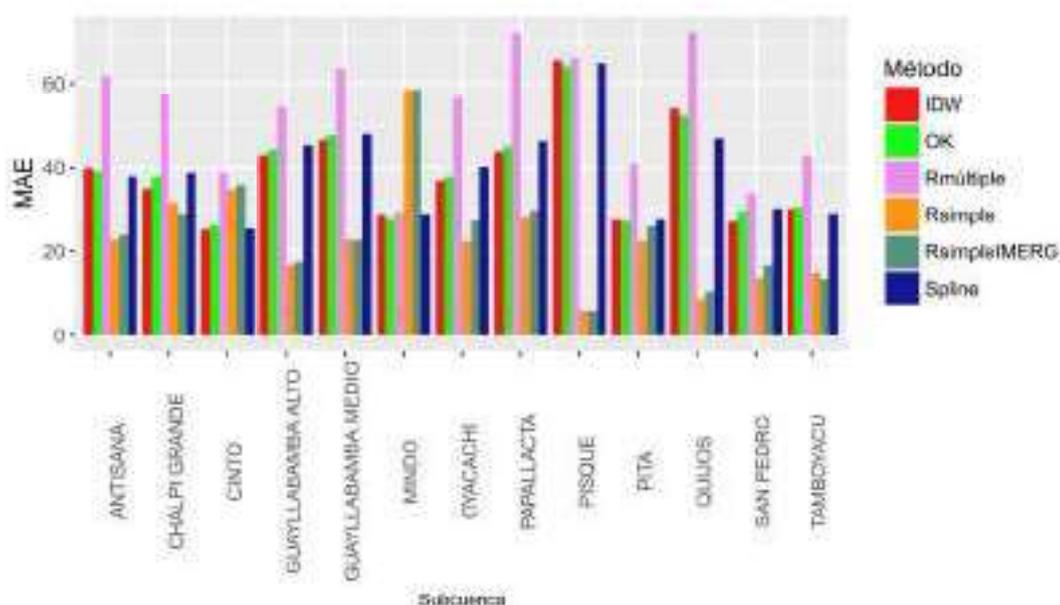
**FIGURA 4.45:** Error medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3  
ELABORADO POR: Christian Díaz

El RMSE con el valor más bajo (6.94) pertenece a la subcuenca de Pisque para regresión lineal simple con IMERG y un valor máximo (83.97) de la subcuenca de Papallacta para regresión lineal múltiple. Cabe mencionar que RMSE para el producto IMERG v3 presenta valores entre 30 y 50 *mm*. En la zona de estudio, el promedio de RMSE es de 43.34 *mm*. Se observa que el error medio absoluto (MAE), presenta valores bajos (5.74, 8.73) para la subcuenca de Pisque y Quijos. Los valores máximos de MAE se producen en la subcuenca de Papallacta y Pisque con el método de regresión lineal múltiple (72.31 y 72.54), respectivamente.



**FIGURA 4.46:** Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz

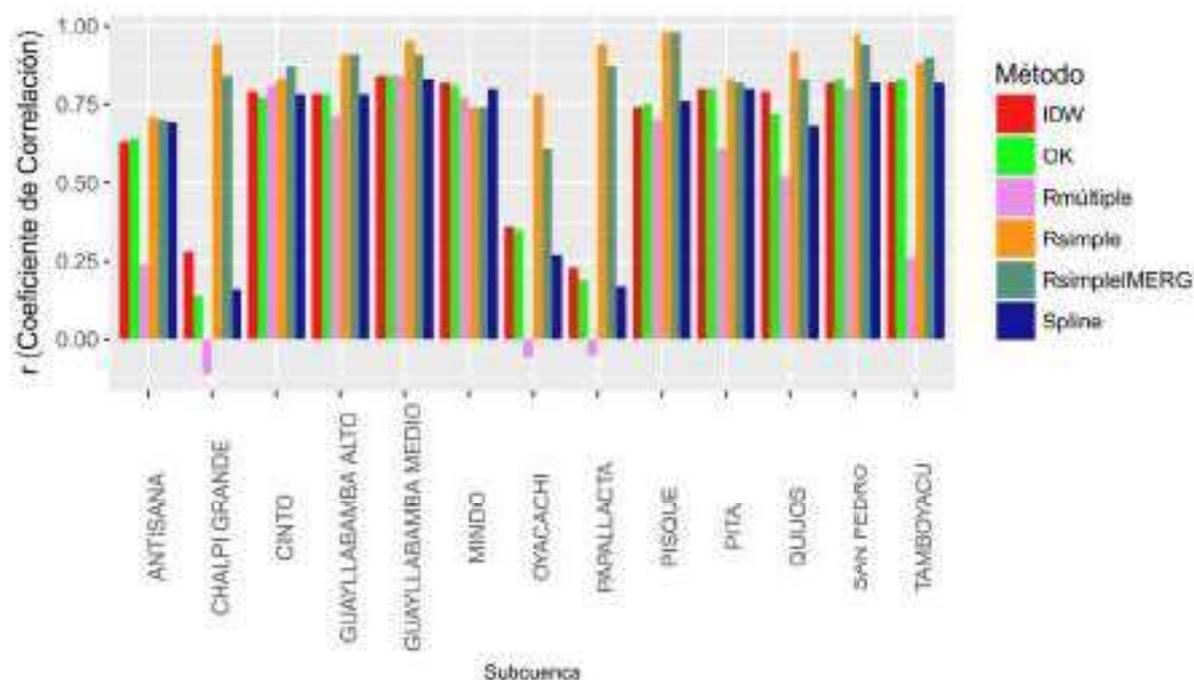


**FIGURA 4.47:** Error medio absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz

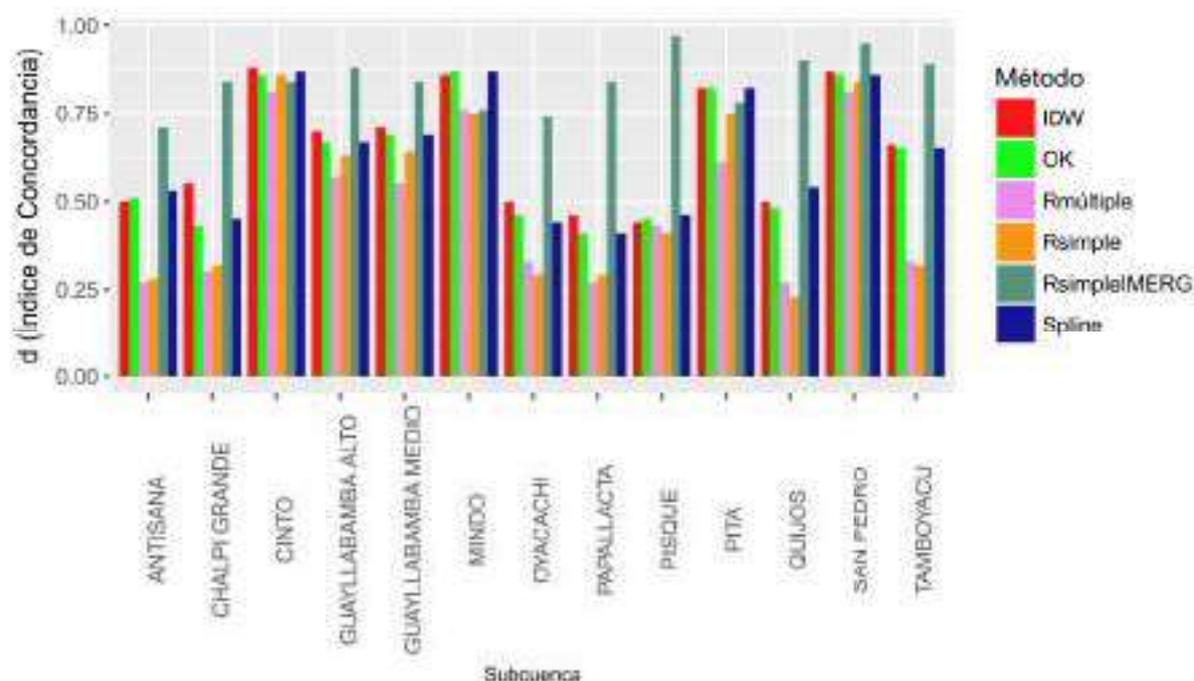
En relación al coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) se obtuvieron valores mínimos (0.14, 0.17) para la subcuenca Chalpi Grande, valores medios entre 0.6 y 0.8 y valores altos (0.98) de la subcuenca de Pisque. En la Figura 4.48 se presentan estos resultados de manera cuantitativa para cada subcuenca. El análisis del desempeño del producto satelital respecto al coeficiente de Pearson no representa magnitud de los errores, sino la magnitud de la relación entre las estimaciones del satélite y los datos observados por los pluviómetros. El coeficiente de Pearson muestra valores aceptables de correlación y en promedio para

la zona de estudio el valor es de 0.62. Acerca del índice de concordancia (d) se obtuvo valores mínimos entre 0.5 y 0.6 (Antisana, Chalpi Grande, Papallacta, Pisque) y valores altos entre 0.8 y 0.9, siendo la subcuenca de San Pedro y el Pisque, las que tienen los valores máximos (0.87 y 0.88). Se debe notar que los valores de coeficiente de Pearson son similares con este índice (Figura 4.49), proporcionando información concreta sobre la estimación cuantitativa entre el producto y los pluviómetros. El índice de concordancia al ser una medida del grado en el cual las estimaciones satelitales están libres de errores, que indica que el satélite representa la precipitación cualitativa y cuantitativamente para la zona de estudio. En promedio el valor de índice de concordancia para la zona de estudio es 0.63.



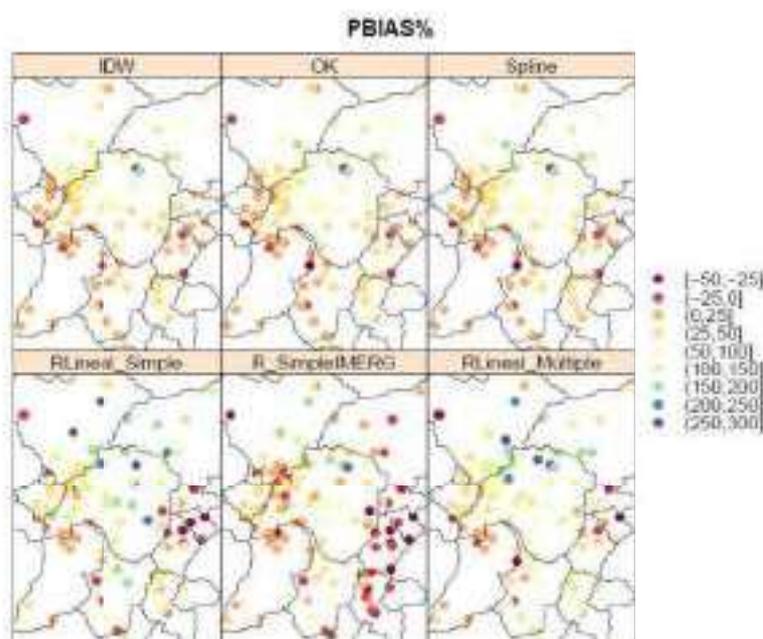
**FIGURA 4.48:** Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz

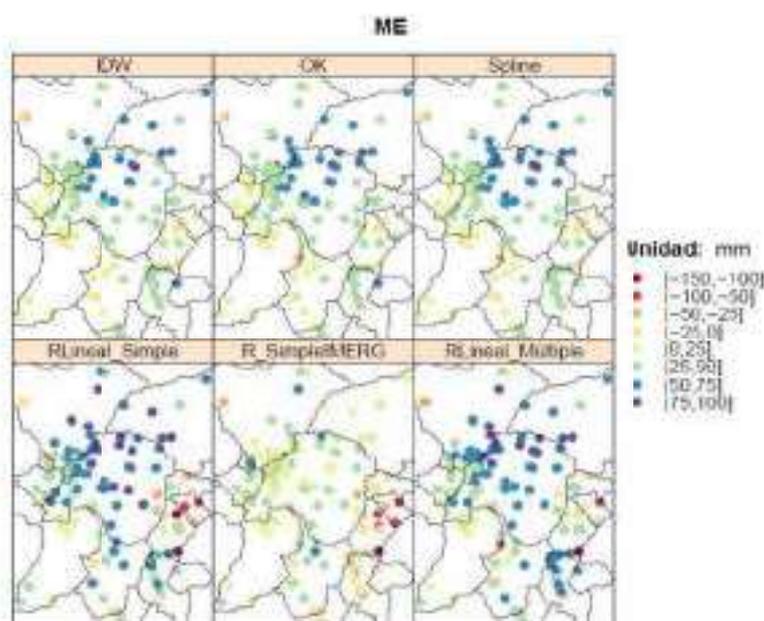


**FIGURA 4.49:** Índice de concordancia (d) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3  
ELABORADO POR: Christian Díaz

También se pueden representar las métricas estadísticas gráficamente (Figura 4.50, Figura 4.51, Figura 4.52, Figura 4.53, Figura 4.54, Figura 4.55) para determinar las zonas donde se producen las zonas con mayores errores estadísticos (PBias%, ME, RMSE, etc.)

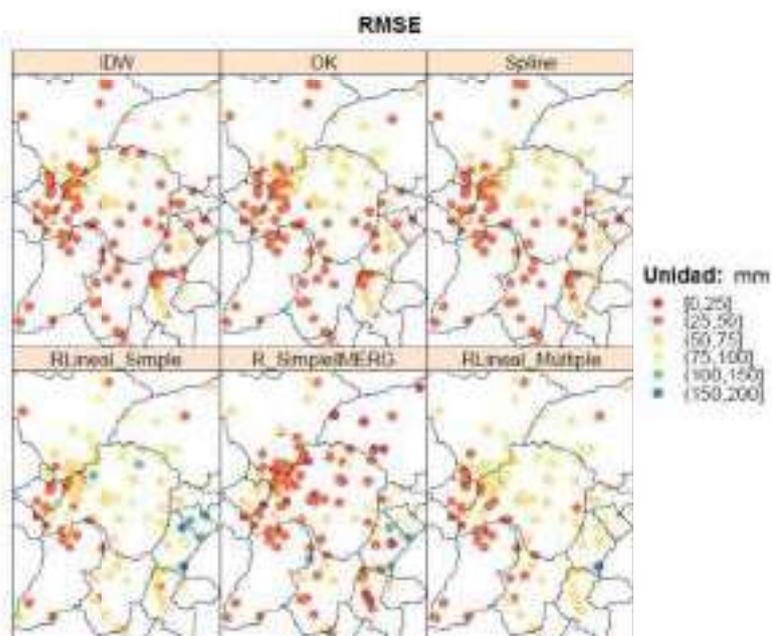


**FIGURA 4.50:** Mapa de PBIAS% para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3  
ELABORADO POR: Christian Díaz



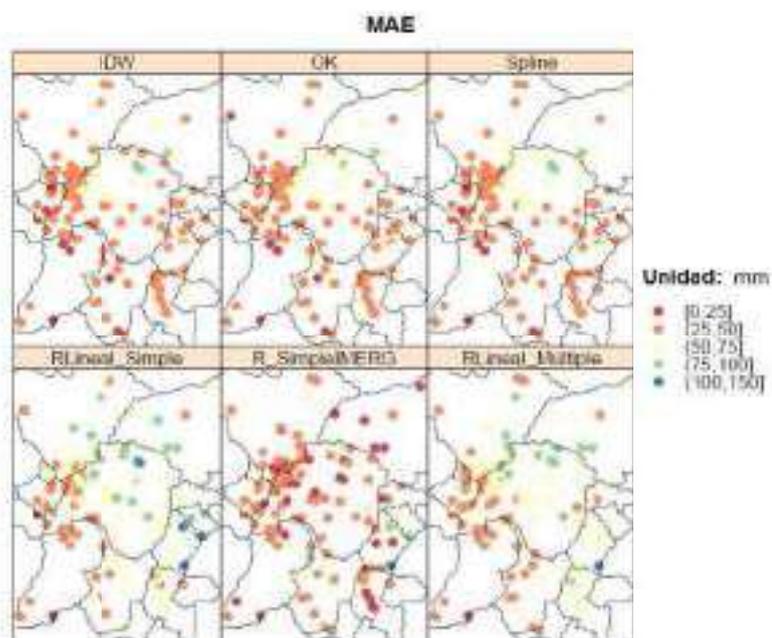
**FIGURA 4.51:** Mapa de Error Medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz



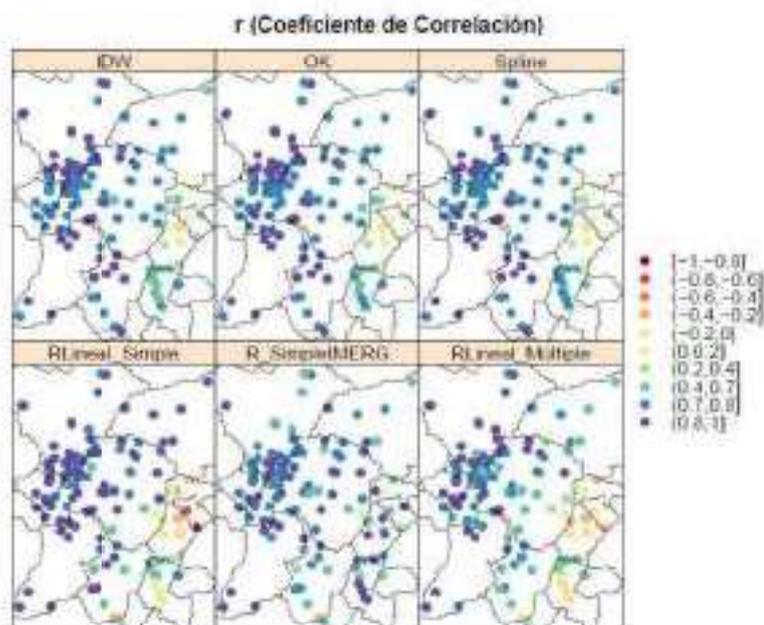
**FIGURA 4.52:** Mapa de Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz



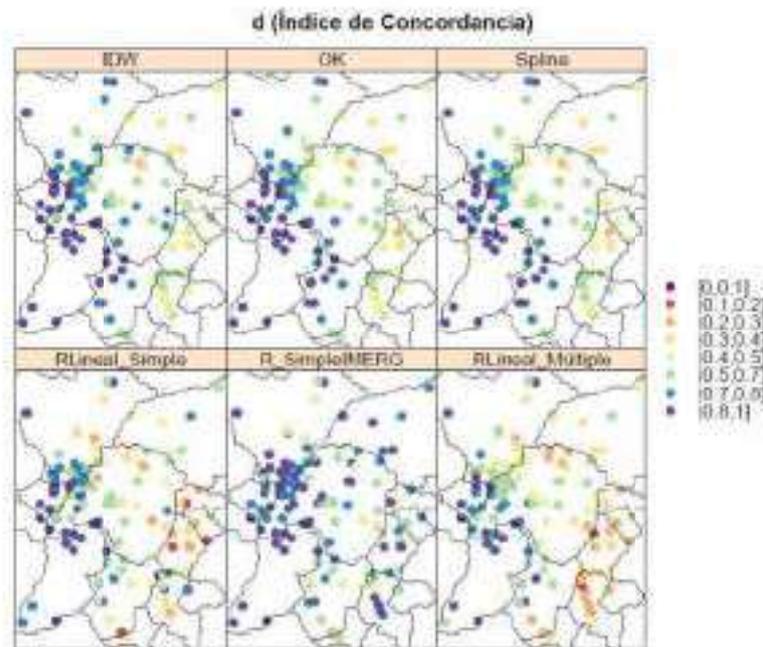
**FIGURA 4.53:** Mapa de Error Medio Absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.54:** Mapa de Coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.55:** Mapa de Índice de Concordancia (d) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

ELABORADO POR: Christian Díaz

En general, gráficamente se visualiza que IMERG tiene menores errores al compararlo con las métricas estadísticas de TMPA, debido a la resolución espacial. IMERG v3 al tener una alta definición ( $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$ ), estima la precipitación de manera cualitativa y cuantitativa inclusive para las subcuencas con régimen de precipitación unimodal (Chalpi Grande, Papallacta, Oyacachi), a diferencia de TMPA v7.

#### 4.3.1.2 Índices de Detección

##### Índices de Detección - Métodos de relleno temporales

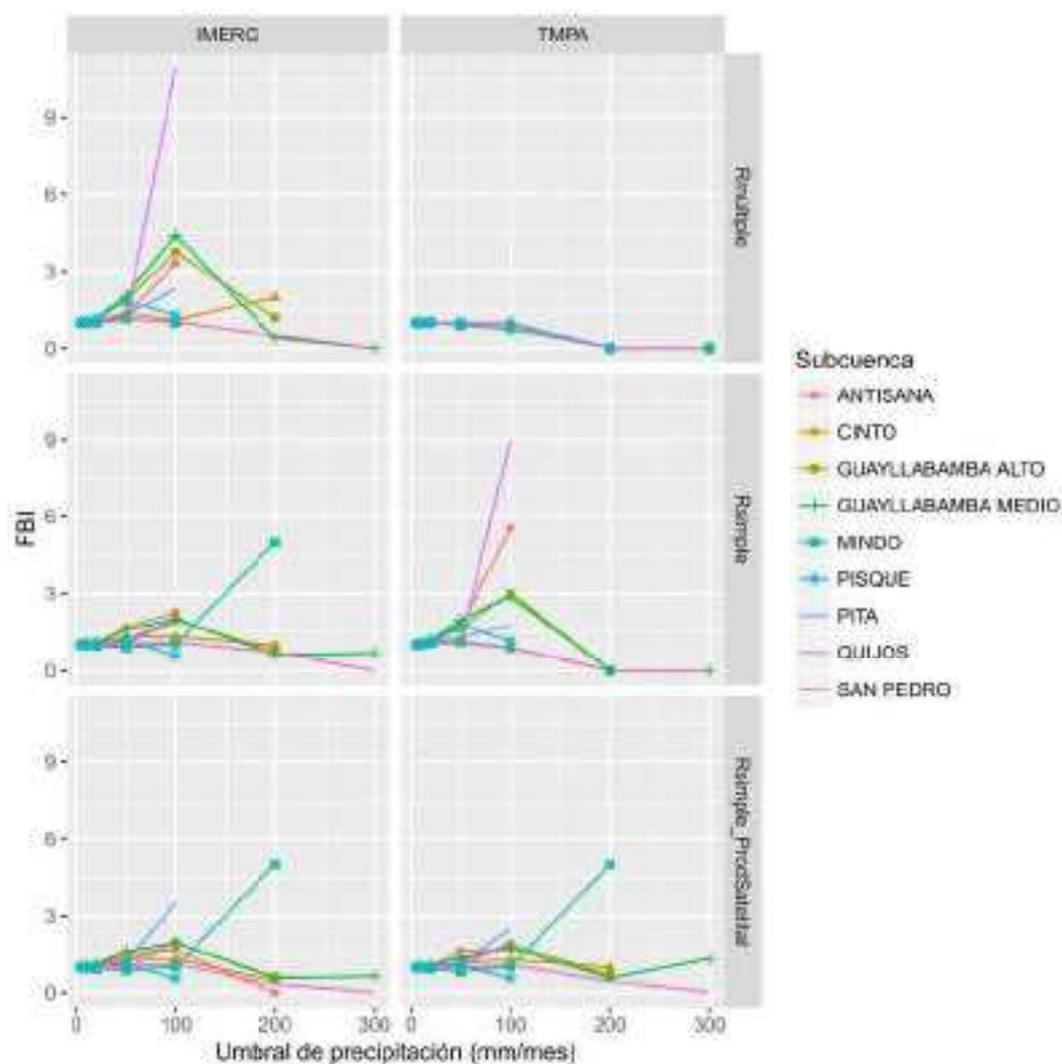
Los resultados de índices de detección se muestran en en las Figuras (Figura 4.57, Figura 4.56, Figura 4.59, Figura 4.58, Figura 4.61, Figura 4.60, Figura 4.63, Figura 4.62).

##### Probabilidad de Detección (FBI)

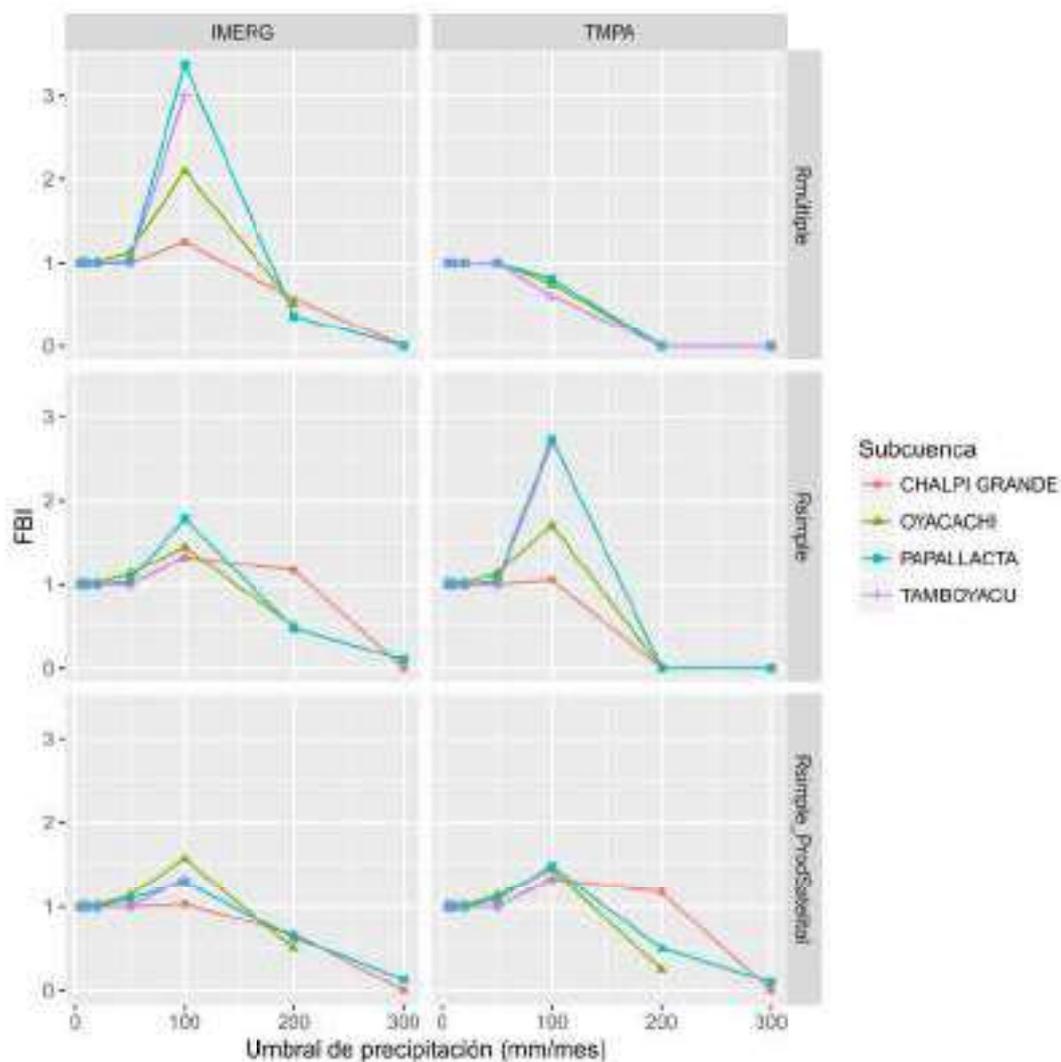
En TMPA, para la frecuencia de sesgo (FBI) en los pluviómetros de las subcuencas Antisana, Quijos y Tamboyacu se sobreestimó la precipitación con valores que sobrepasan a 1, inclusive llegan a valores muy altos como en Quijos (9.00) para precipitaciones mayores a 100 mm. En general, se tiene valores que sobrepasan el valor perfecto (1.00) de FBI con un valor promedio de 1.46 para la zona de estudio. Lo que indica que la precipitación observada rellena por métodos temporales contrasta de manera aceptable con la precipitación estimada por el satélite. También se estima que FBI toma valores cercanos al valor perfecto para precipitaciones menores a 50 mm.

En IMERG, para la frecuencia de sesgo (FBI) en los pluviómetros de las subcuencas Antisana, Papallacta y Tamboyacu se sobreestimó la precipitación con valores que sobrepasan a 1, inclusive alcanzan valores muy altos como en Quijos (11.00) para precipitaciones mayores

a 100 mm. En general, se tiene valores que sobrepasan el valor perfecto (1.00) de FBI con un valor promedio de 1.21 en precipitaciones menores a 200 mm para la zona de estudio. También se estima que FBI toma valores cercanos al valor perfecto para precipitaciones menores a 50 mm y al sobrepasar este valor para la mayoría si no son todas las subcuencas existe una sobreestimación significativa.



**FIGURA 4.56:** Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz

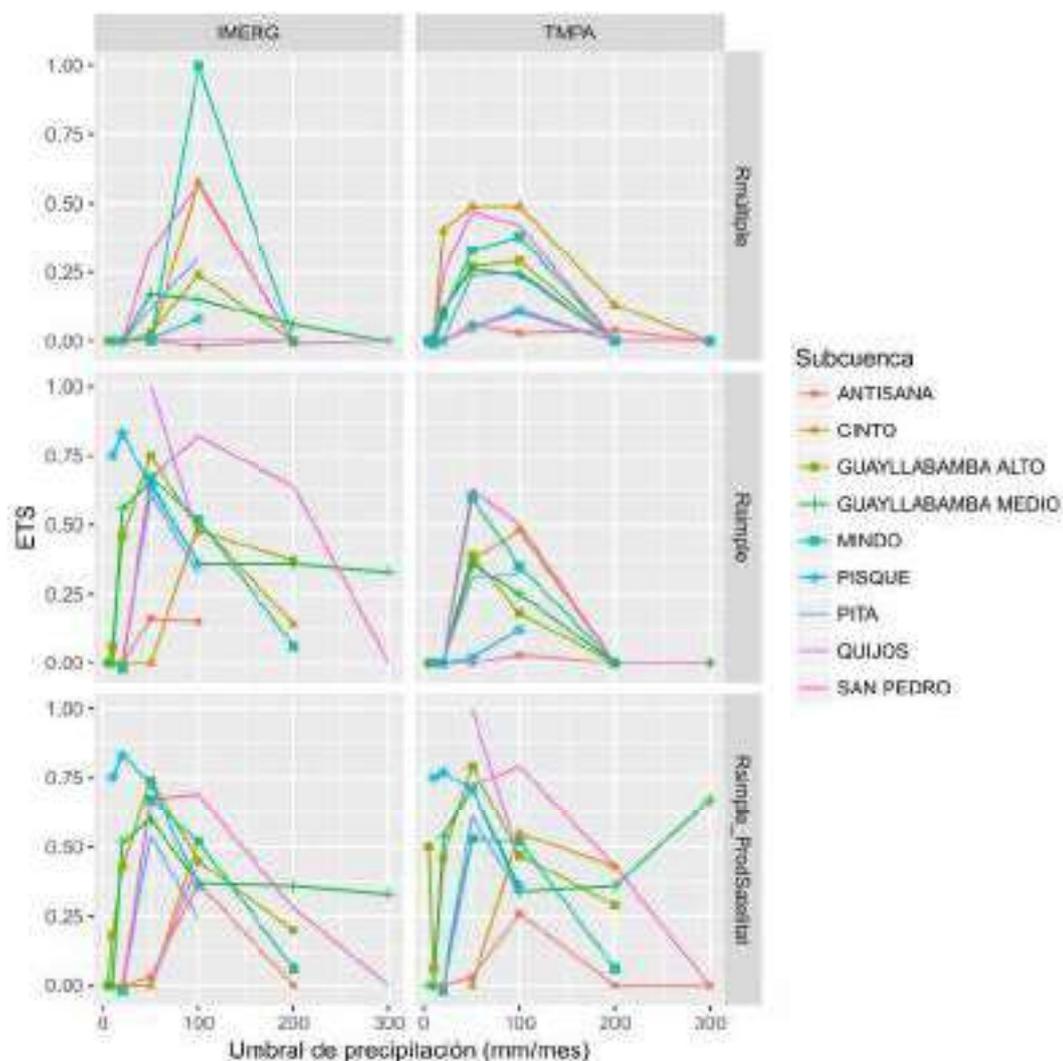


**FIGURA 4.57:** Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal  
ELABORADO POR: Christian Díaz

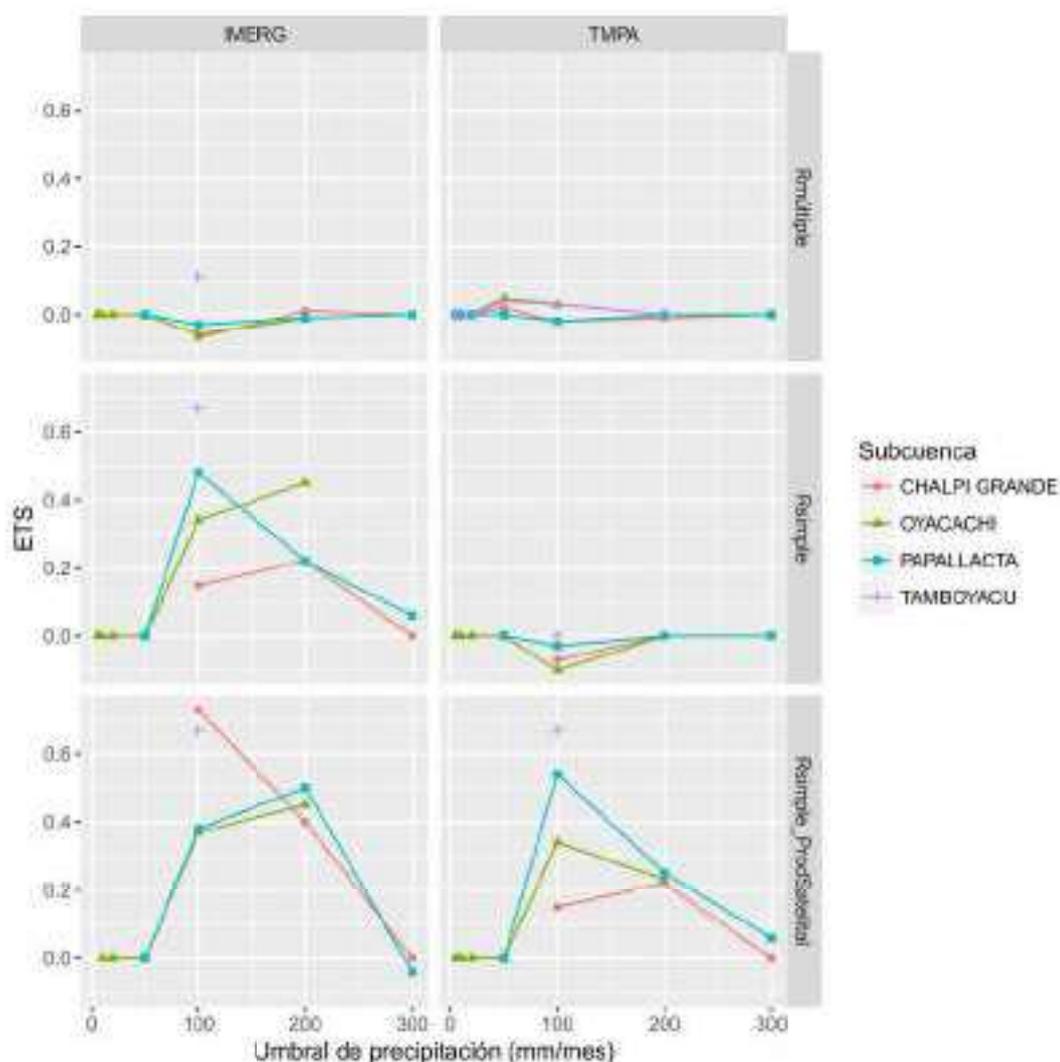
### Probabilidad de Detección (ETS)

Con TMPA, los valores ETS fueron menores a los POD debido a que las detecciones son al azar, de la misma manera también hay que considerar el cambio de tendencia. La mayoría de pluviómetros de las subcuencas variaron de valores promedios ETS de 0.1 y 0.8, con valores altos (0.74) para subcuenca de San Pedro. En general, los valores del índice ETS para todos los pluviómetros tienden a aumentar para umbrales de precipitación entre 20 y 100 *mm*, pero a partir de 200 *mm* estos decrecen (Figura 4.58). Los valores encontrados están alejados del valor perfecto de ETS lo que indica que no existe una correcta detección a partir de los 100 *mm*. En IMERG, la mayoría de pluviómetros de las subcuencas variaron de valores promedios ETS de 0.0 y 0.1, con valores altos (0.7) para subcuenca de San Pedro y un valor mínimo (0.00) para Quijos, Pisque y Tamboyacu para precipitaciones menores a 200 *mm*. Esto indica que existen errores considerables de detección del satélite para estas subcuencas. En general, los valores del índice ETS para todos los pluviómetros tienden a aumentar para umbrales de precipitación entre 20 y 100 *mm*, pero a partir de 200 *mm*

estos decrecen. El valor promedio de ETS para la zona de estudio es de 0.05.



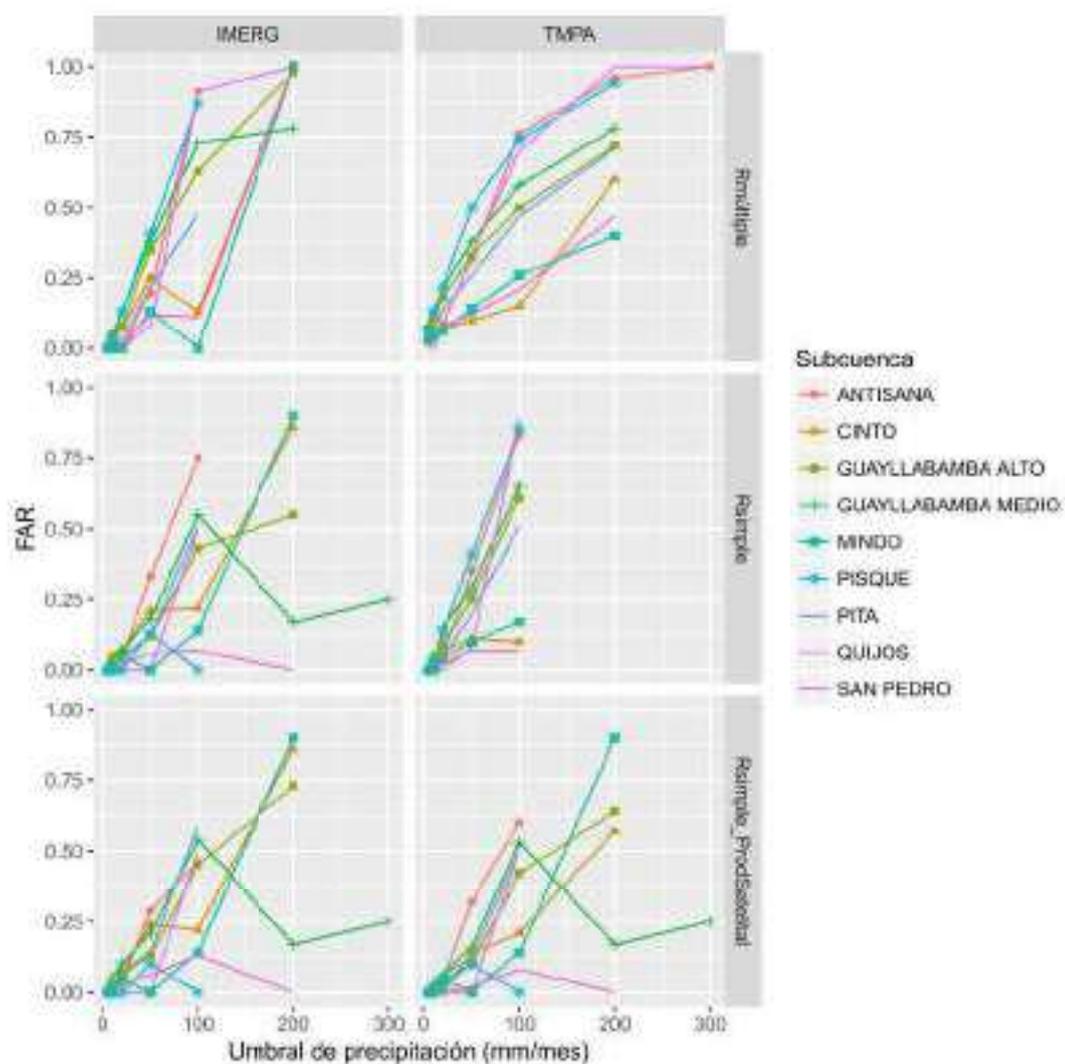
**FIGURA 4.58:** Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz



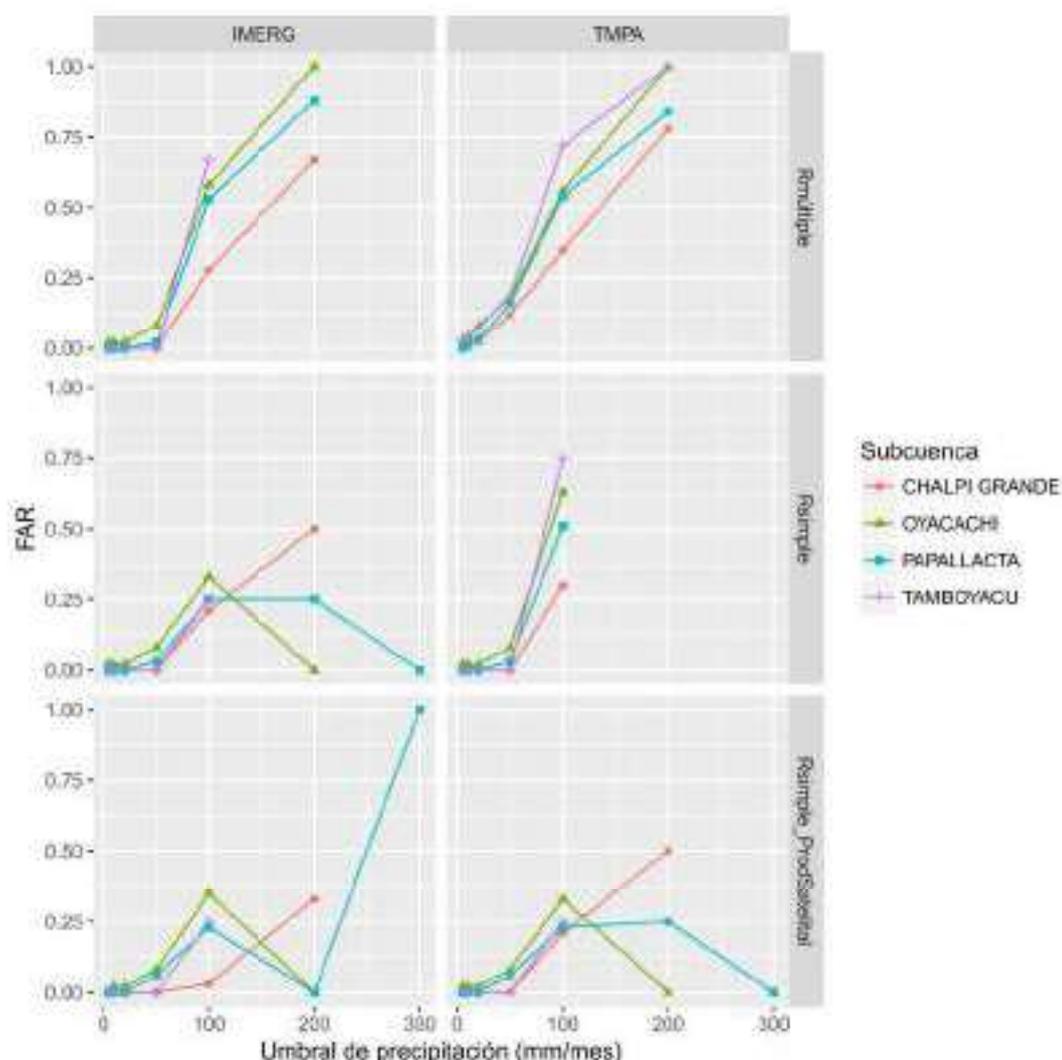
**FIGURA 4.59:** Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### Probabilidad de Detección (FAR)

En cuanto a FAR para los pluviómetros de las subcuencas de Mindo, Pita y San Pedro no se emitieron falsas alarmas, pues indica valores muy cercanos a 0. Sin embargo, esto no es del todo cierto porque se puede deber a que no existen muchas estaciones con las cuales comparar y aseverar que no se producen falsas alarmas. En general, para precipitaciones cercanas a 100 *mm* el FAR tiende a tomar valores cercanos a 1, lo que indica mayor tendencia a emitir falsas alarmas. En promedio, la zona de estudio tiene una FAR de 0.15, es decir, existe una porción mínima de precipitación captada por el satélite que en realidad no ocurrió. En IMERG, para precipitaciones mayores a 50 *mm* el FAR tiende a tomar valores cercanos a 1, lo que indica mayor tendencia a emitir falsas alarmas. Pita y Cinto tiene un FAR de alrededor de 0.2, por lo que se dice que emitió menos falsas alarmas. En promedio, la zona de estudio tiene una FAR de 0.29 para precipitaciones menores a 200 *mm*, es decir, dentro de este rango se puede tener certeza que el satélite no emitirá falsas alarmas.



**FIGURA 4.60:** Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz



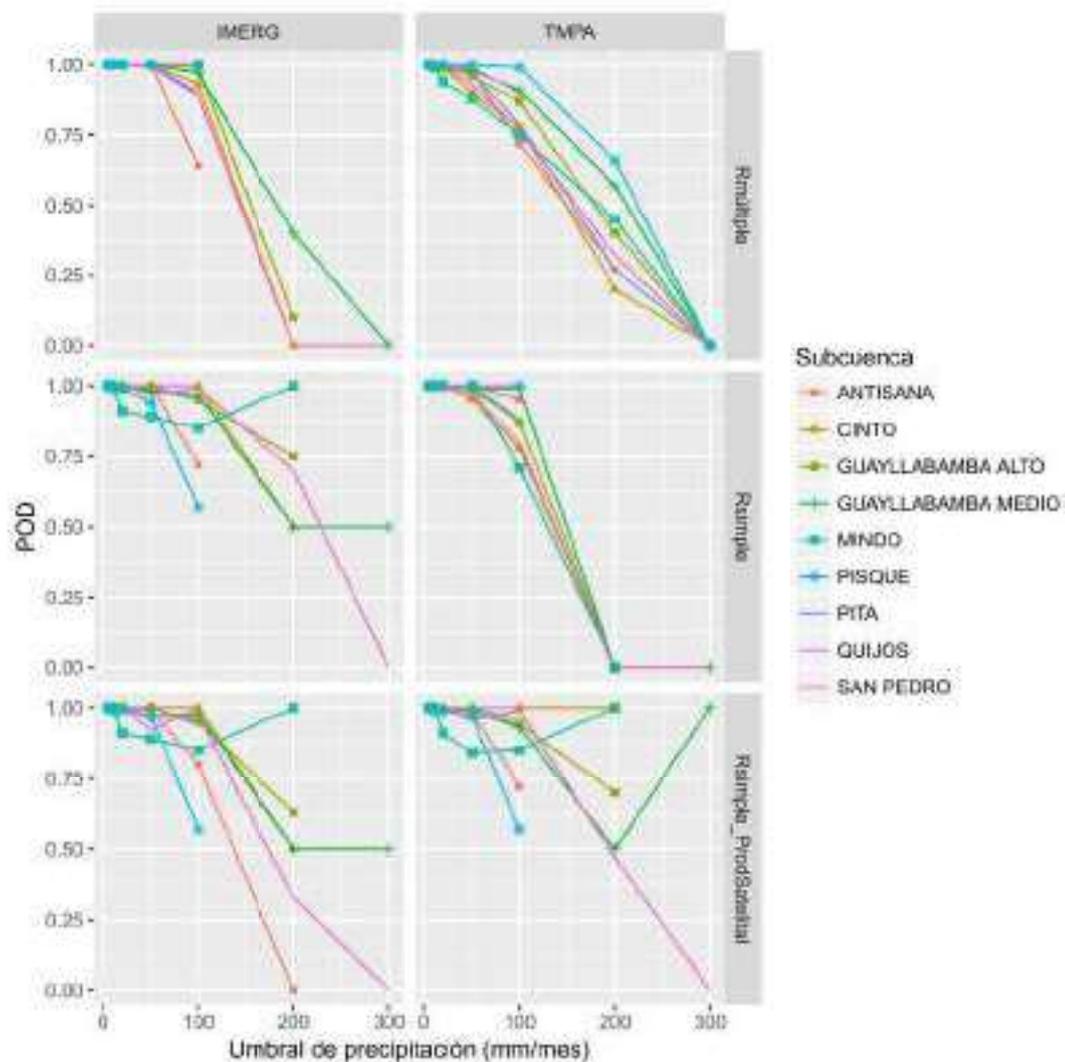
**FIGURA 4.61:** Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### Probabilidad de Detección (POD)

El POD mostró valores promedios altos y cercanos a 1 para todos los pluviómetros de las subcuencas en el área de estudio. Existe detección perfecta del satélite para todas las subcuencas en precipitaciones menores a 50 mm. En Pisque se obtuvo un valor POD de 1 inclusive para precipitaciones cercanas a 100 mm, lo que nos indica una detección perfecta del satélite para este rango. Se obtuvo un valor promedio de 0.96 para precipitaciones cercanas a 100 mm para la zona de estudio, es decir la gran mayoría de la precipitación en los umbrales realmente ocurrió.

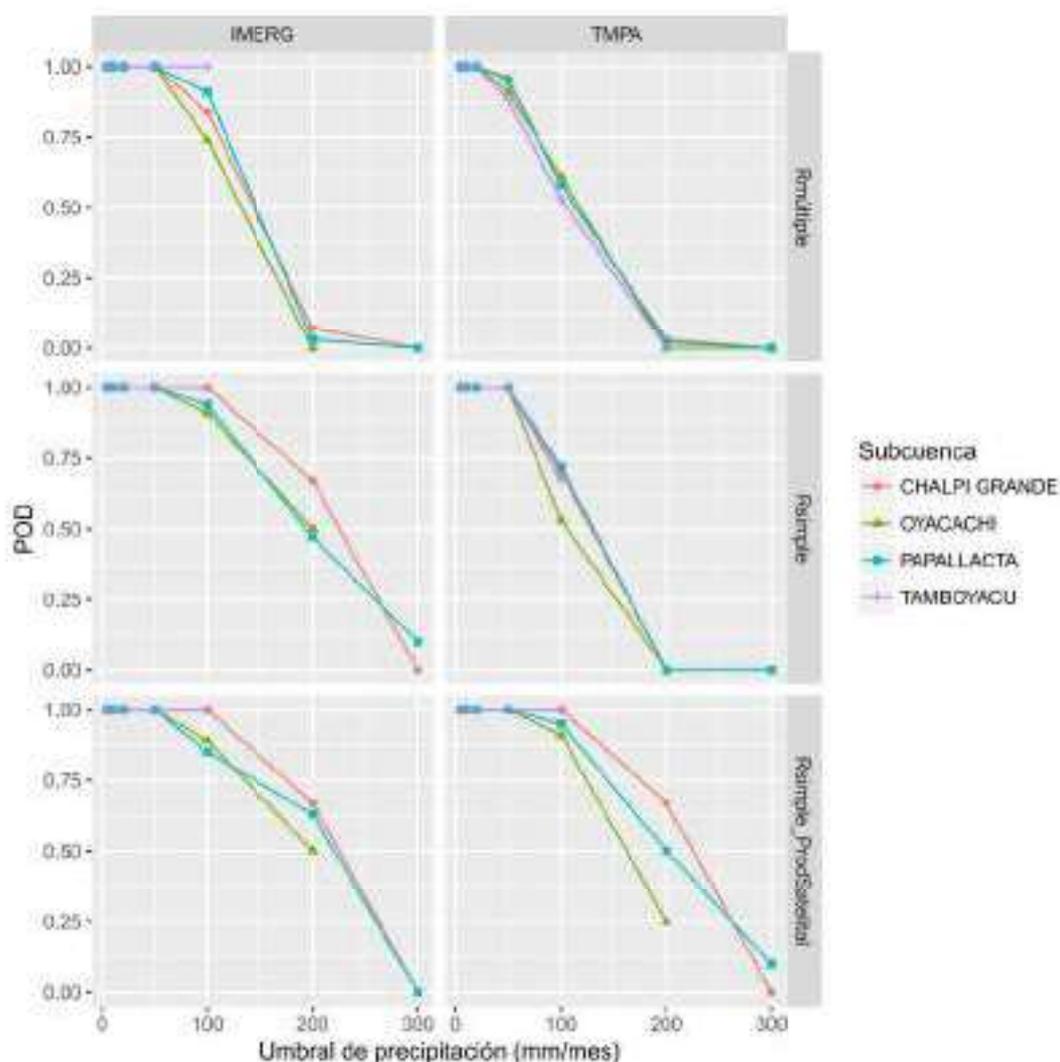
En IMERG, existe alta detección del satélite para la subcuenca de Pisque y seguida de Guayllabamba Medio y Antisana con POD 0.97 y 0.93, respectivamente. Todas la subcuencas presentan detección perfecta para umbrales de precipitación menores a 100 mm. Se determina que Chalpi Grande, Oyacachi, Papallacta y Tamboycacu tienden a decrecer más rápidamente que el resto para precipitaciones que sobrepasan los 100 mm. Se obtuvo un

valor promedio de 0.81 para la zona de estudio, es decir la mayoría de precipitación en los umbrales realmente ocurrió.



**FIGURA 4.62:** Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz

Los productos satelitales comparados con los métodos de relleno temporales para las subcuencas de régimen unimodal muestran una tendencia decreciente a partir de los 100 mm de precipitación. Oyacachi y Papallacta alcanzan valores cercanos a 0.5 para precipitaciones menores a 200 mm y cuando sobrepasan este valor ya no se detectan POD.



**FIGURA 4.63:** Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Temporales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal  
ELABORADO POR: Christian Díaz

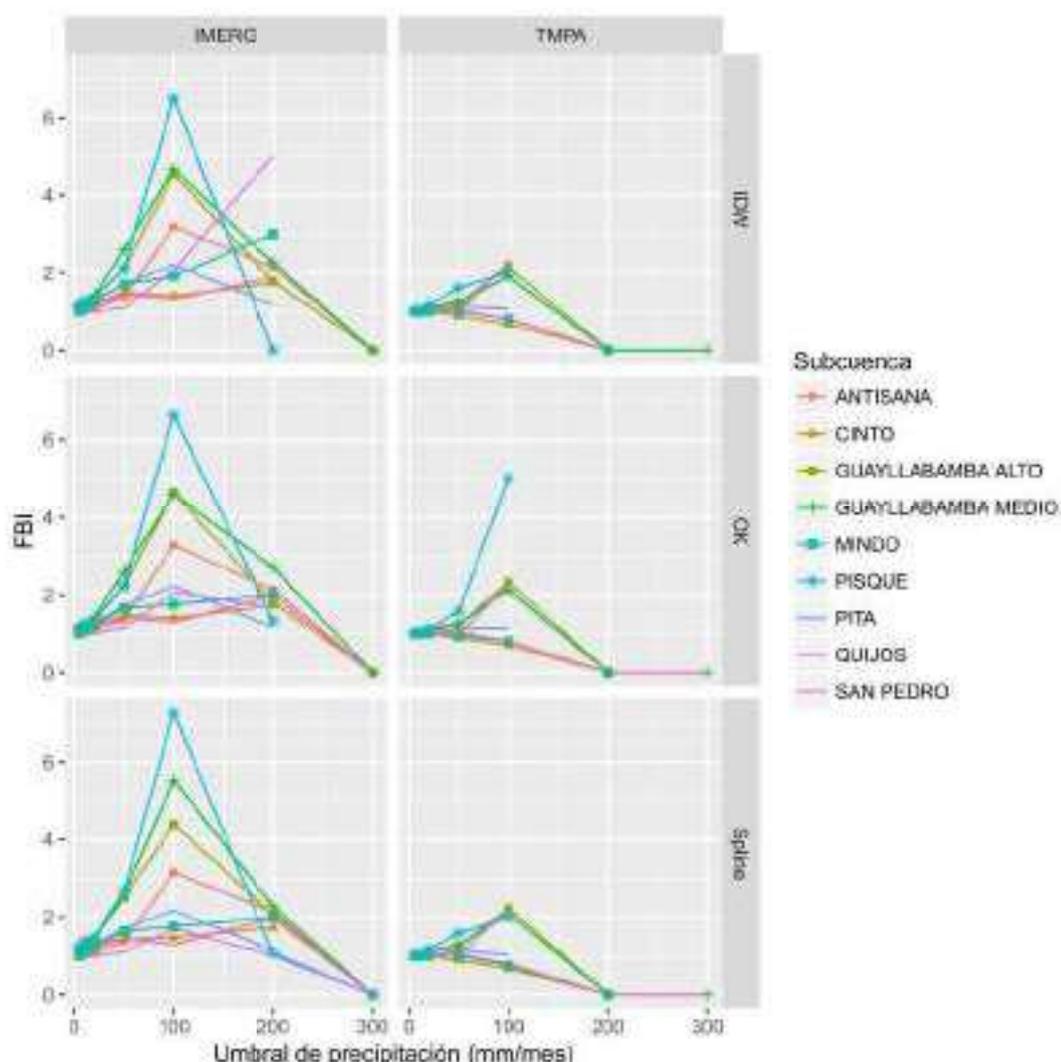
### Índices de Detección - Métodos de relleno espaciales

Los resultados de índices de detección se muestran en las Figuras (Figura 4.65, Figura 4.64, Figura 4.67, Figura 4.66, Figura 4.69, Figura 4.68, Figura 4.71 y Figura 4.70).

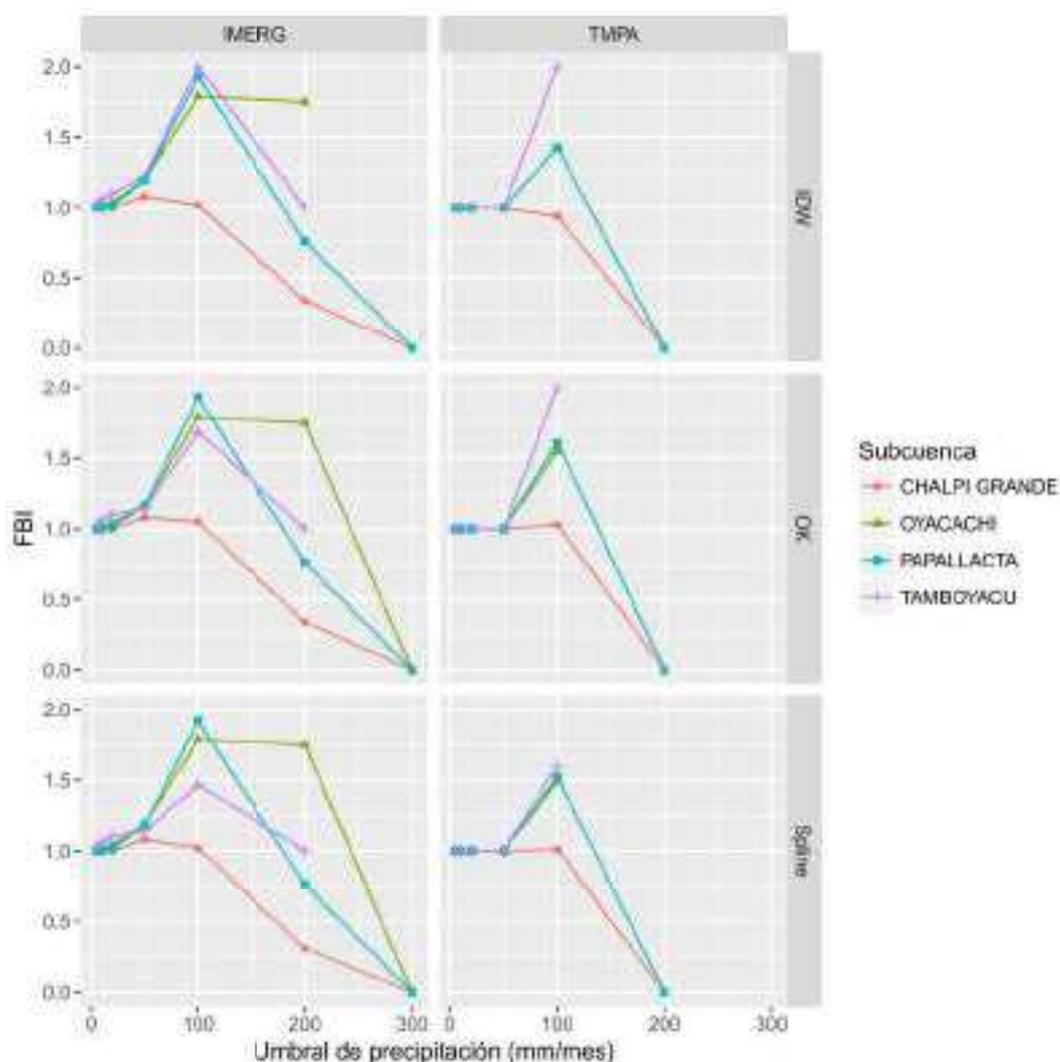
### Probabilidad de Detección (FBI)

Para la frecuencia de sesgo (FBI) en los pluviómetros de las subcuencas Antisana, Quijos y Tamboyacu se sobreestimó la precipitación con valores muy cercanos a 1, excepto para Pisque donde se obtuvo un valor FBI de 5 en precipitaciones cercanas a 100 mm. En los pluviómetros de las subcuencas de Cinto, San Pedro, Mindo y Chalpi Grande se subestimó la precipitación con valores cercanos a 1. En general, para TMPA se tiene valores buenos de FBI con un valor promedio de 1.02 para la zona de estudio. Lo que indica que la precipitación observada por los pluviómetros contrasta de manera adecuada con la precipitación estimada por el satélite.

En IMERG, para la frecuencia de sesgo (FBI) en los pluviómetros de Pisque se obtuvo un valor FBI de 7.28. Este valor se obtuvo porque para precipitaciones mayores a 50 mm tenemos una sobreestimación de FBI. En los pluviómetros de la subcuenca de Chalpi Grande se subestimó la precipitación con valores cercanos a 1 en precipitaciones menores a 100mm. A partir de 100 mm de precipitación el valor de FBI decrece para las subcuencas con régimen unimodal y datos rellenados con métodos espaciales. En general, se tiene valores que sobrepasan el valor perfecto (1.00) de FBI con un valor promedio de 1.46 para la zona de estudio, lo que indica que la precipitación observada por los pluviómetros contrasta de manera aceptable con la precipitación estimada por el satélite.



**FIGURA 4.64:** Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz



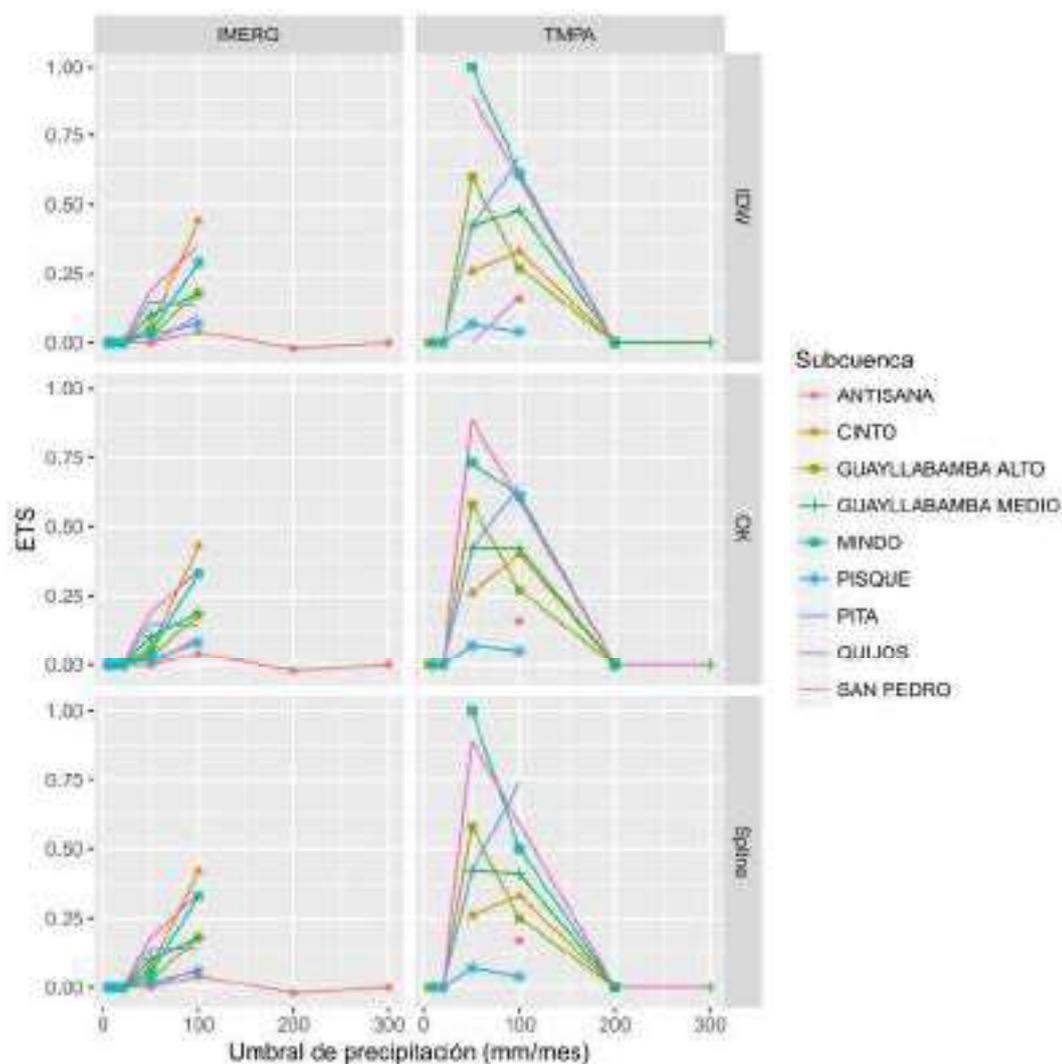
**FIGURA 4.65:** Índices FBI para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal.  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### Probabilidad de Detección (ETS)

Los valores ETS fueron menores a los POD debido a que las detecciones son al azar, de la misma manera también hay que considerar el cambio de tendencia. La mayoría de pluviómetros de las subcuencas variaron de valores promedios ETS de 0.1 y 0.4, con valores altos (0.54) para subcuenca de Mindo y un valor mínimo (0.01) para Papallacta. En general, los valores del índice ETS para todos los pluviómetros tienden a aumentar para umbrales de precipitación entre 20 y 100 *mm*, pero a partir de 200 *mm* estos decrecen (Figura 4.66) y se puede ver que ya no toma valores debido a que no existen observaciones mayores a 200 *mm* por parte de los pluviómetros. El valor promedio de ETS para la zona de estudio es de 0.17.

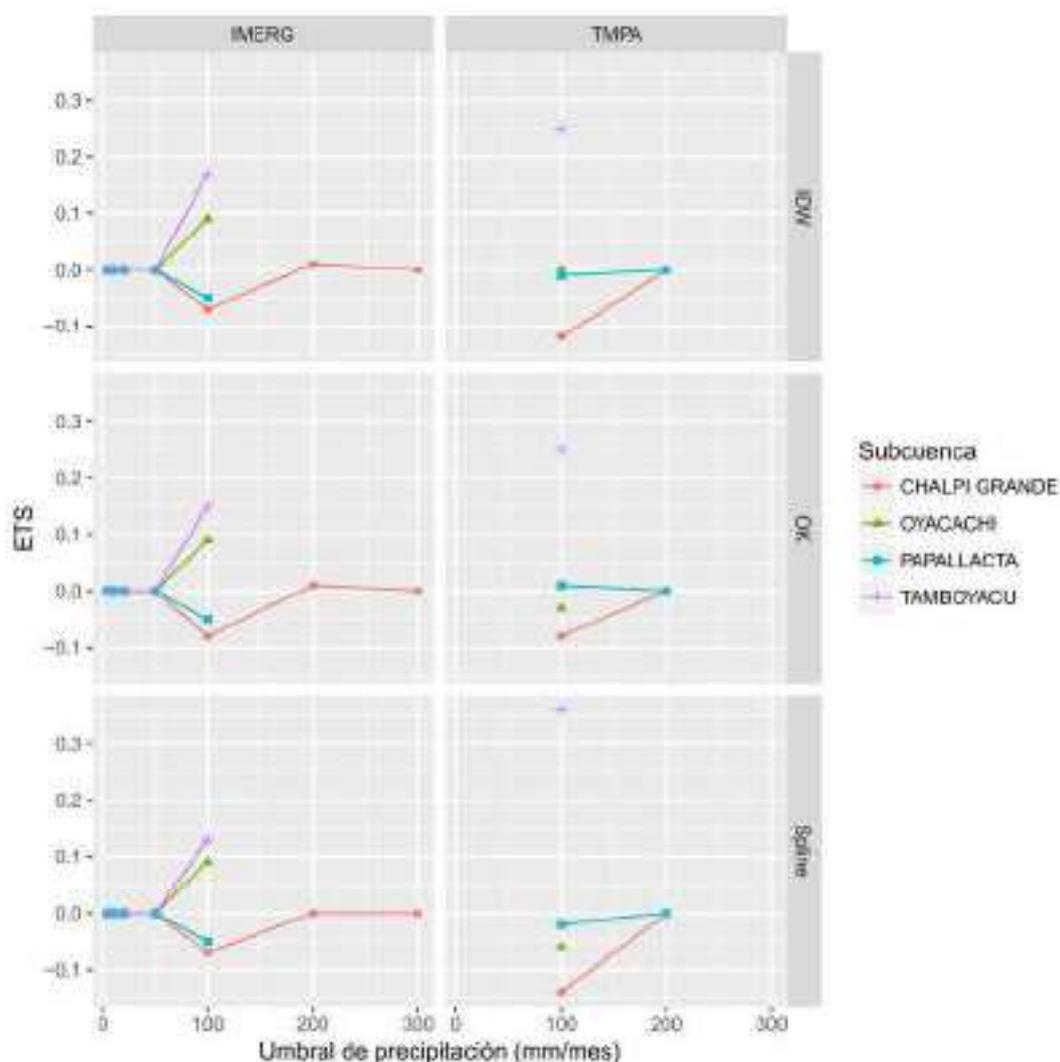
La mayoría de pluviómetros de las subcuencas variaron de valores promedios ETS de 0.0 y 0.4, con valores altos (0.8) para subcuenca de Mindo en precipitaciones cercanas a 50 *mm*. En el caso de IMERG al compararlo con subcuencas de régimen bimodal existen valores de

ETS para precipitaciones menores a 100 *mm* para todos los métodos de relleno espaciales. En general, los valores del índice ETS para todos los pluviómetros tienden a aumentar para umbrales de precipitación entre 20 y 100 *mm*, pero a partir de 200 *mm* estos decrecen o no existen (Figura 4.67), porque los pluviómetros no presentan valores superiores a 200 *mm*. El valor promedio de ETS para la zona de estudio es de 0.04.



**FIGURA 4.66:** Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 *mm* de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En subcuencas de régimen unimodal existen valores de ETS cercanos a cero e inclusive valores negativos en precipitaciones menores a 200 *mm*. Esto se debe inicialmente porque los productos satelitales sin corregir no representan la precipitación a nivel cualitativo y por ende tampoco hay concordancia a nivel cuantitativo. IMERG capta levemente la precipitación para valores menores a 100 *mm* debido a que tiene mayor resolución espacial.



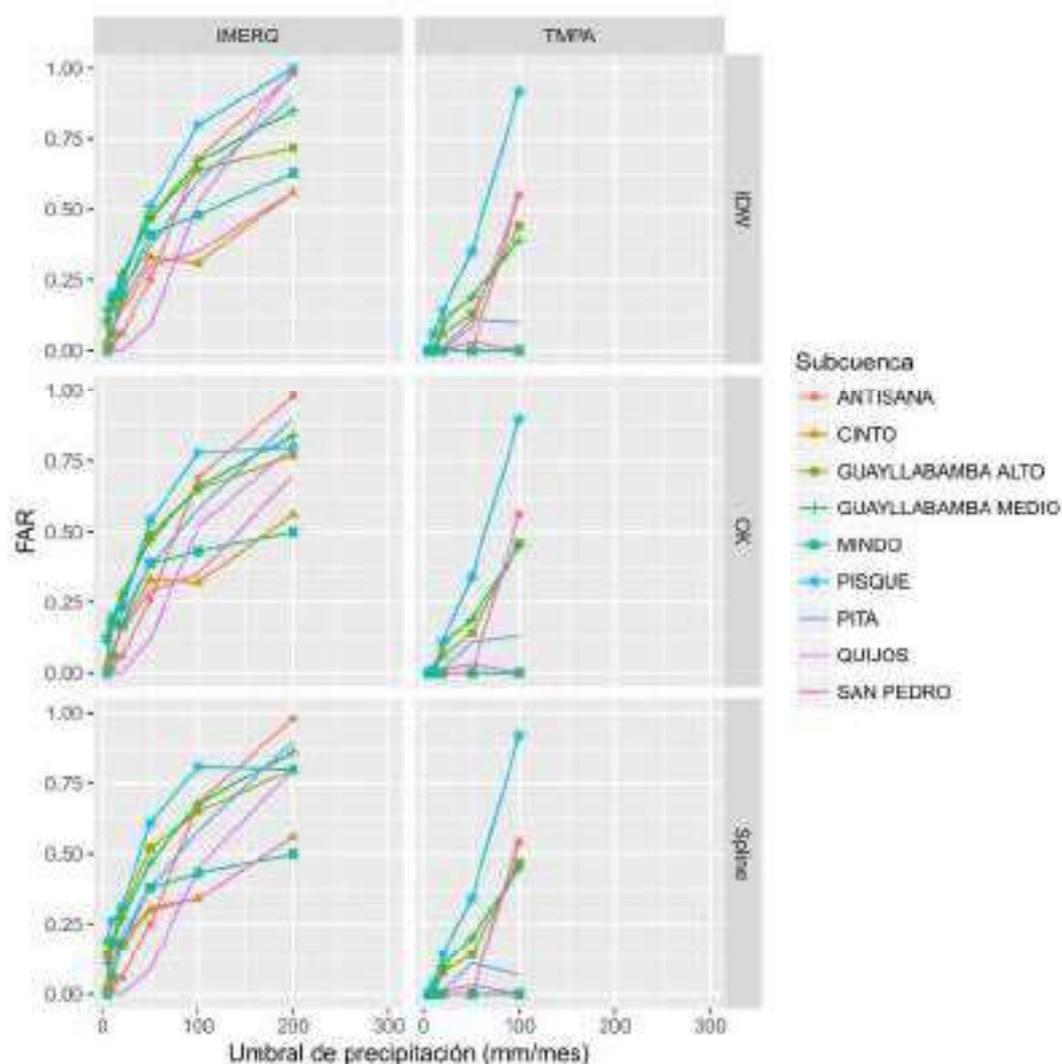
**FIGURA 4.67:** Índices ETS para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal.  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### Probabilidad de Detección (FAR)

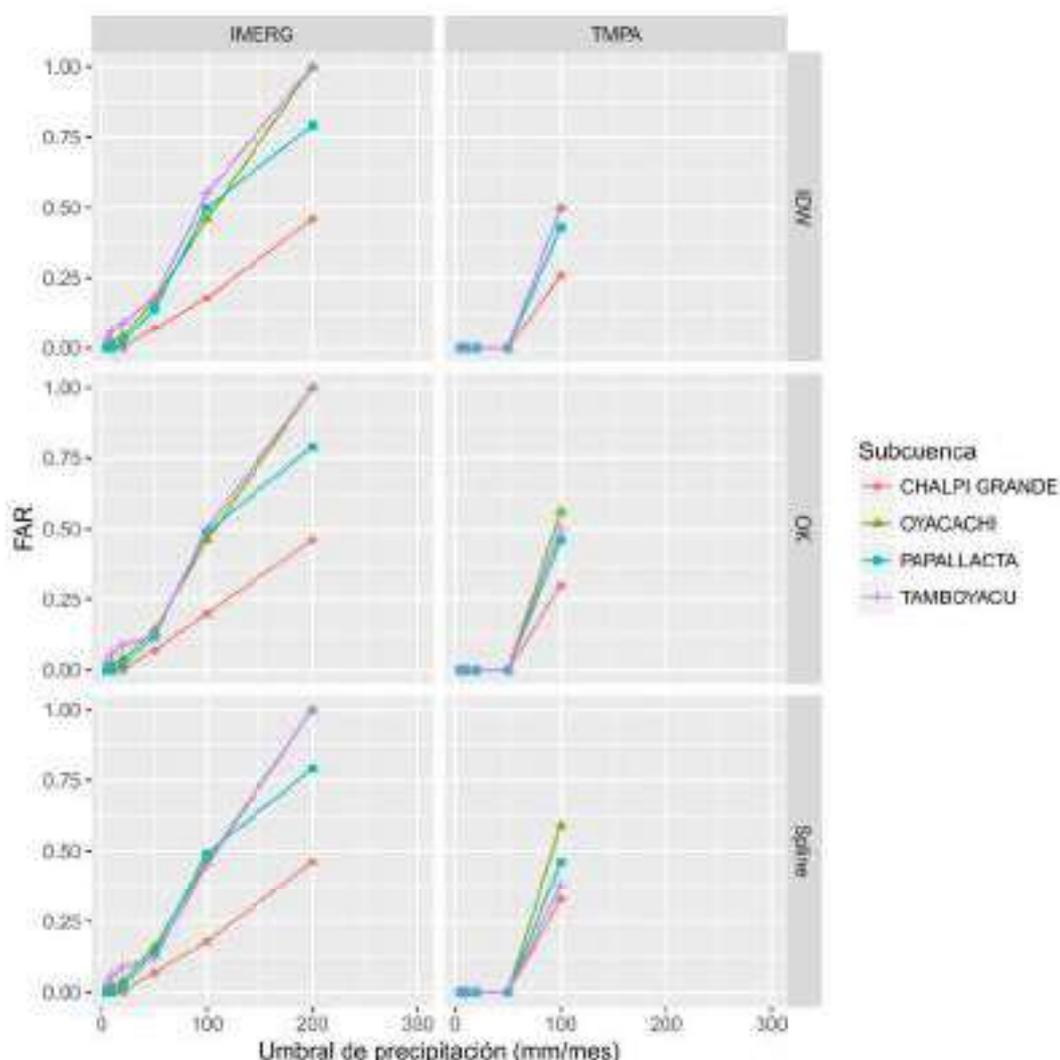
En cuanto a FAR para los pluviómetros de las subcuencas de Mindo, Cinto y Chalpi Grande no se emitieron falsas alarmas, pues indica valores muy cercanos a 0, cuando se compara con el producto TMPA. Sin embargo, para Quijos, Pisque y Guayllabamba Medio se obtuvieron valores altos de FAR ya que para valores de precipitación mayor a 100 mm se tiene valores cercanos a 1, es decir que el satélite detectó precipitaciones mayores a 100 mm, mientras que los pluviómetros no lo detectaron. En general, para precipitaciones entre 100 y 200 mm el FAR tiende a tomar valores cercanos a 1, lo que indica mayor tendencia a emitir falsas alarmas. Pisque tiene un FAR de 0.29, por lo que emitió más falsas alarmas. En promedio, la zona de estudio tiene una FAR de 0.09, es decir, existe una porción mínima de precipitación captada por el satélite que en realidad no ocurrió.

Con IMERG, los pluviómetros de las subcuencas de Cinto y Chalpi Grande no emitieron falsas alarmas, pues indica valores de FAR muy cercanos a 0. Sin embargo, para Quijos,

Pisque y Guayllabamba Medio se obtuvieron valores altos de FAR ya que para valores de precipitación cercanos a 100 *mm* se tiene valores cercanos a 1, es decir que el satélite detectó precipitaciones mayores a 100 *mm*, mientras que los pluviómetros no lo detectaron. En general, para precipitaciones mayores a 100 *mm* el FAR tiende a tomar valores cercanos a 1 para subcuencas de régimen unimodal y bimodal, lo que indica mayor tendencia a emitir falsas alarmas, que evidentemente son causadas por la sobreestimación del satélite. Pisque tiene un FAR de 0.48, por lo que emitió más falsas alarmas, seguido por Guayllabamba Alto y Pita. En promedio, la zona de estudio tiene una FAR de 0.30. El producto satelital IMERG permite evaluar este índice hasta 200 *mm* de precipitación, en donde alcanza su máximo valor de FAR (1.00) en la subcuenca de Oyacachi para los 3 métodos de relleno espaciales. En el caso de TMPA el máximo umbral que alcanza es 100 *mm*, porque no se detectan precipitaciones mayores por parte de los pluviómetros.



**FIGURA 4.68:** Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz



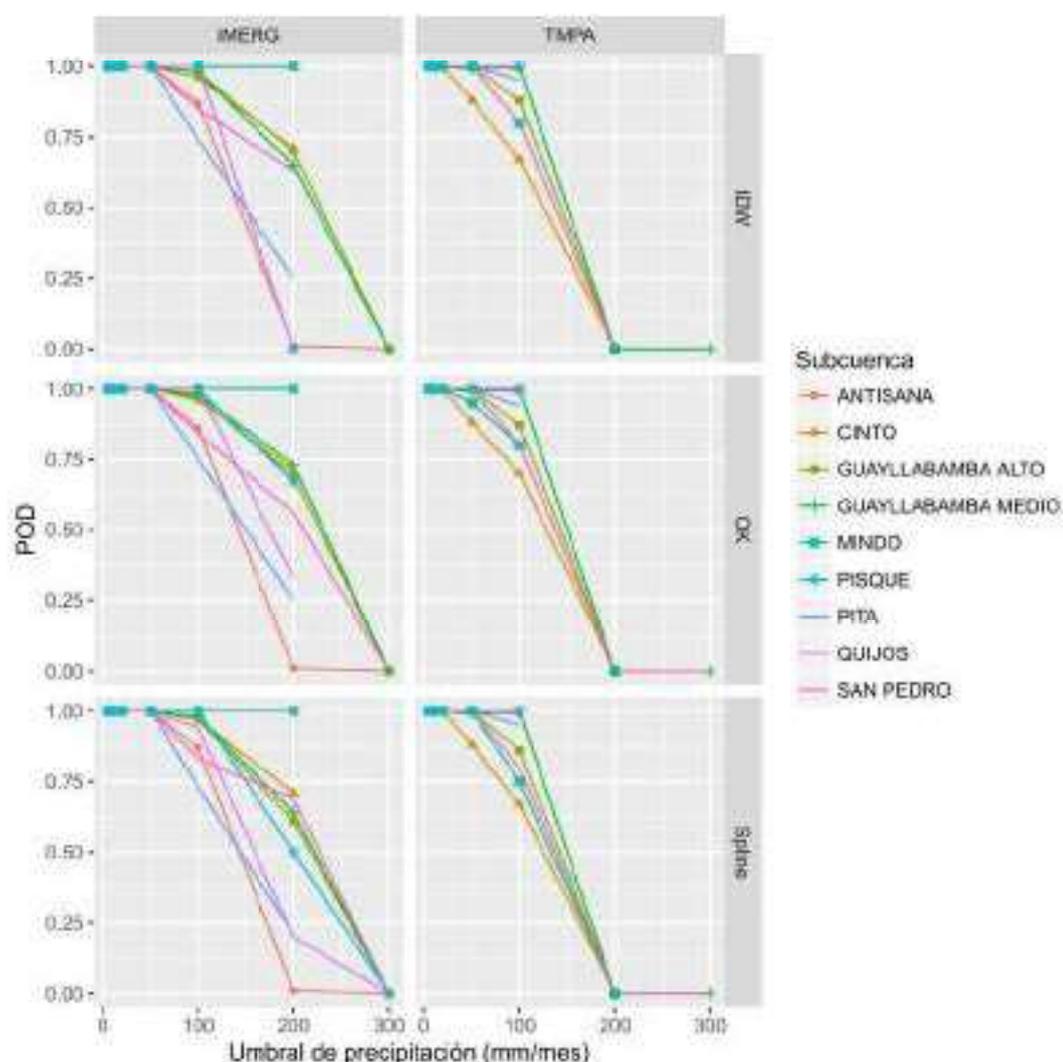
**FIGURA 4.69:** Índices FAR para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal  
ELABORADO POR: Christian Díaz

### Probabilidad de Detección (POD)

El POD mostró valores promedios altos y cercanos a 1 para todos los pluviómetros de las subcuencas en el área de estudio. Existe detección perfecta del satélite para 4 subcuencas (Antisana, Pisque, Quijos y Tamboyacu). En la subcuenca de Pita se obtuvo un valor promedio de 0.99, debido a que en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitaciones mayores a 50 mm, donde decrece a valores de 0.9. En Guayllabamba Medio se obtuvo un valor promedio POD de 0.71, porque en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para valores mayores a 50 mm de precipitación. Se obtuvo un valor promedio de 0.87 para la zona de estudio, es decir la gran mayoría de la precipitación en los umbrales realmente ocurrió.

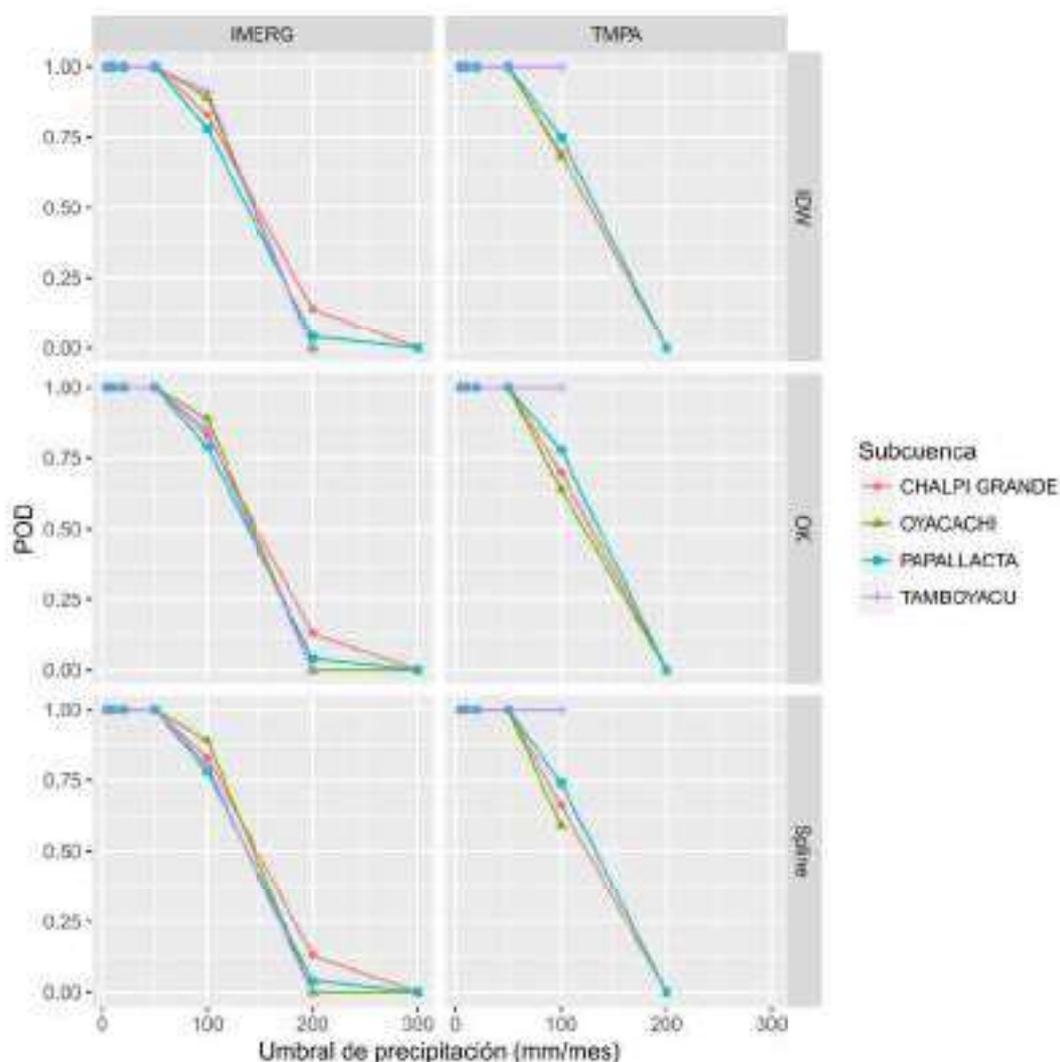
En IMERG, el POD mostró valores promedios altos y cercanos a 1 para todos los pluviómetros de las subcuencas en el área de estudio. Existe detección excelente del satélite para la subcuenca de Mindo y seguida del Cinto y San Pedro con FOD 0.95 y 0.91, respecti-

vamente. En la subcuenca de Cinto se obtuvo un valor promedio de 0.95, debido a que en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para precipitaciones mayores a 50 mm, donde decrece. En Papallacta se obtuvo un valor promedio POD de 0.60, porque en todos los umbrales se obtuvo un valor de 1 excepto para valores mayores a 50 mm de precipitación. Se obtuvo un valor promedio de 0.80 para la zona de estudio, es decir la mayoría de precipitación en los umbrales realmente ocurrió.



**FIGURA 4.70:** Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación bimodal y transición  
ELABORADO POR: Christian Díaz

Mindo tiene un valor POD constante de 1 para precipitaciones menores a 200 mm. Pita, Pisque y el Cinto tienen valores cercanos a 1 para precipitaciones menores a 100 mm, pero cuando superan este valor el POD tiende a decrecer. Este fenómeno sucede más rápido con TMPA para precipitaciones mayores a 50 mm en subcuencas de régimen unimodal.

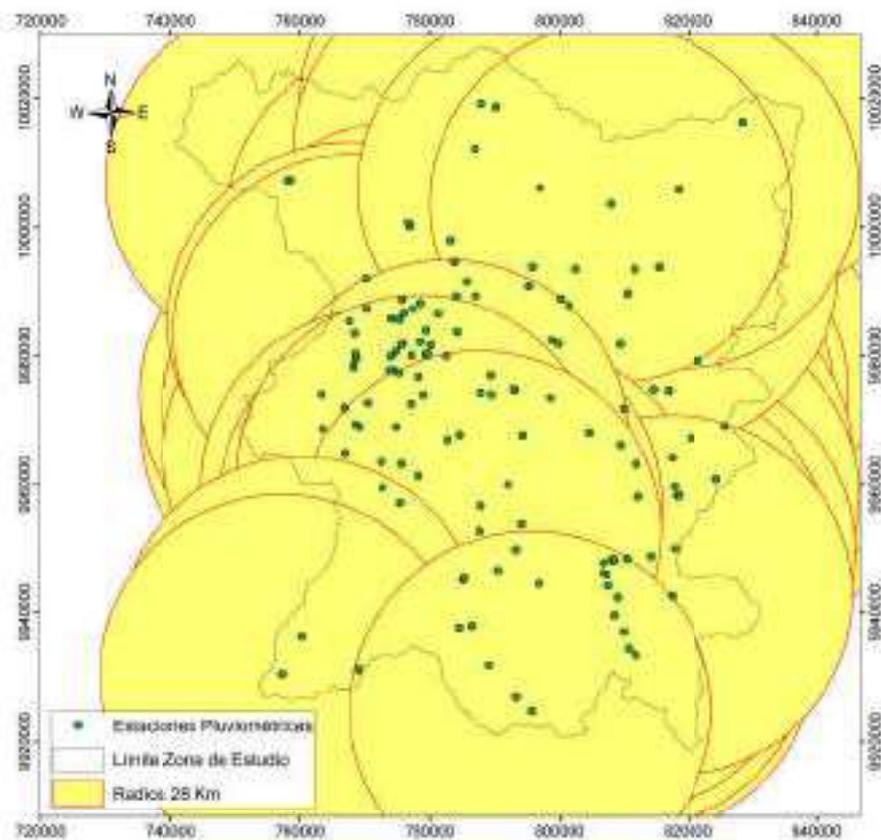


**FIGURA 4.71:** Índices POD para 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 mm de precipitación para los Métodos de Relleno Espaciales en subcuencas con régimen de precipitación unimodal  
ELABORADO POR: Christian Díaz

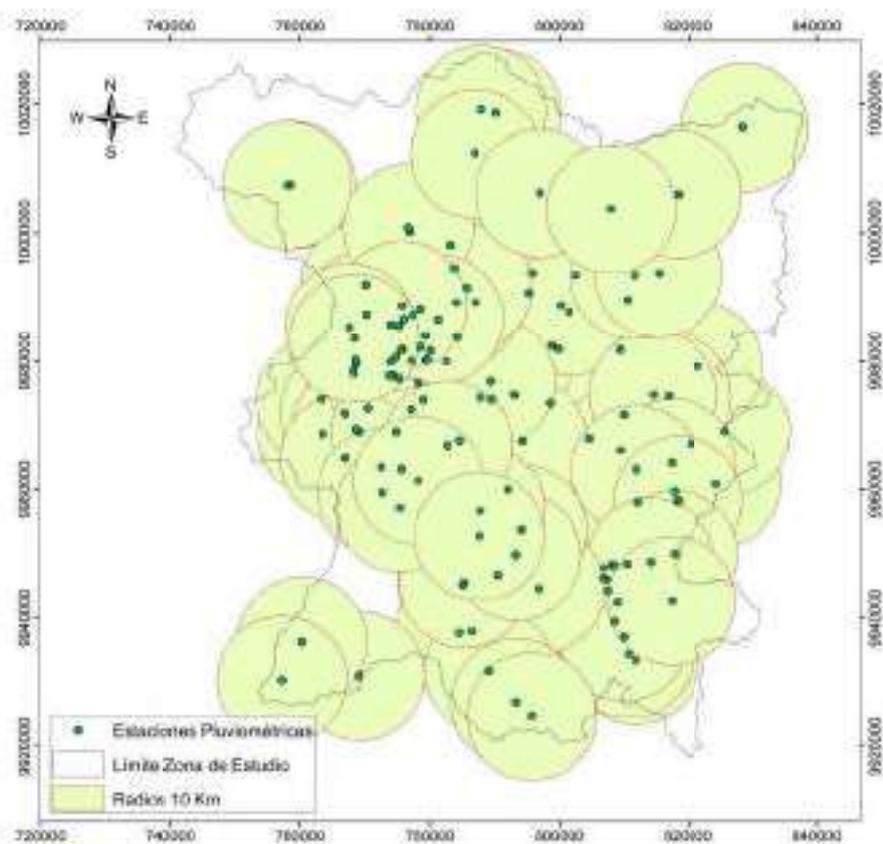
### 4.3.2 ESTRUCTURA ESPACIAL

Según las recomendaciones de densidad de cobertura de la OMM, para zonas de montaña, la cobertura de estaciones pluviométricas registradoras sugerida es de  $2500 \text{ km}^2$  lo cual corresponde a una circunferencia de área similar con radio de  $28,2 \text{ km}$  (Figura 4.72). También se han realizado sucesivas pruebas de radios de influencia menores ( $10 \text{ km}$ ), que corresponde a la densidad sugerida de  $250 \text{ km}^2$  para estaciones pluviométricas no registradoras (Figura 4.73). Sin embargo, ésta es una densidad de cobertura teórica sugerida que no está acorde a la realidad topográfica y la climatología de la zona de estudio por la variabilidad espacial de la precipitación en la región andina. En el DMQ y zonas de aprovechamiento hídrico existen variaciones altitudinales muy importantes que limitan considerablemente la representatividad teórica de las estaciones. La densidad de estaciones obtenida para la zona es  $100 \text{ km}^2/\text{estacion}$  de manera que radios de  $5 \text{ km}$ , correspondiente a una circunferencia de igual área, de manera teórica permiten evaluar la cobertura de estaciones de la zona de estudio (Figura 4.74). Pero éstas son meras hipótesis que se comprueban con los

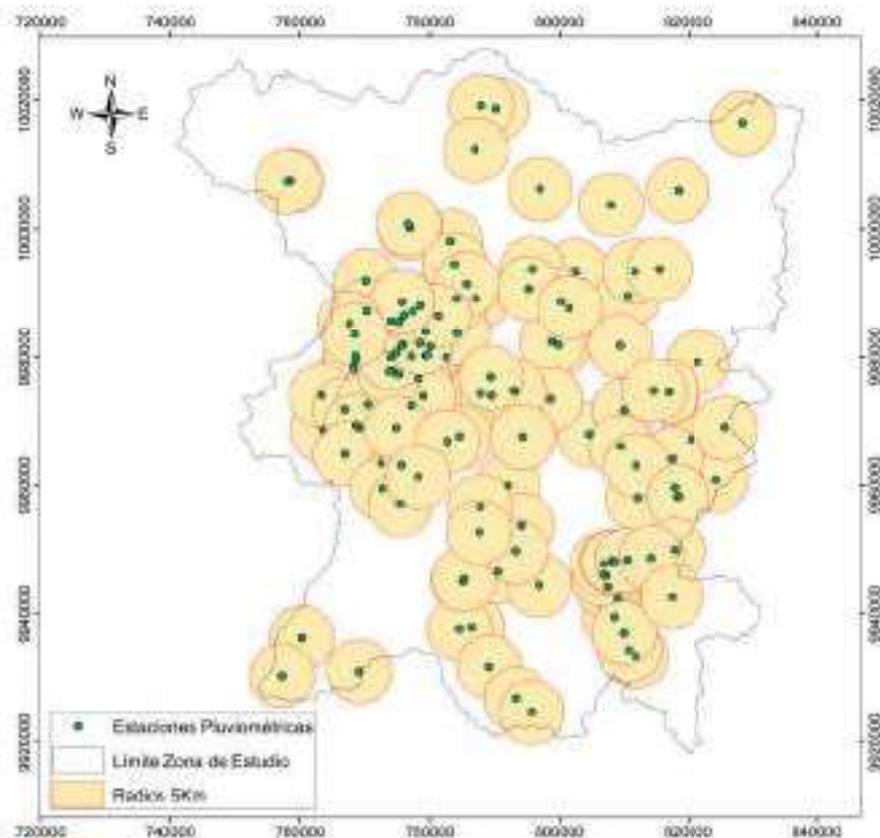
semivariogramas y correlogramas que se realizan a continuación.



**FIGURA 4.72:** Densidad de cobertura de estaciones pluviométricas( $R= 28\text{km}$ )  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.73:** Densidad de cobertura de estaciones pluviométricas(R= 10km)  
ELABORADO POR: Christian Díaz.



**FIGURA 4.74:** Densidad de cobertura de estaciones pluviométricas( $R=5\text{km}$ )  
ELABORADO POR: Christian Díaz.

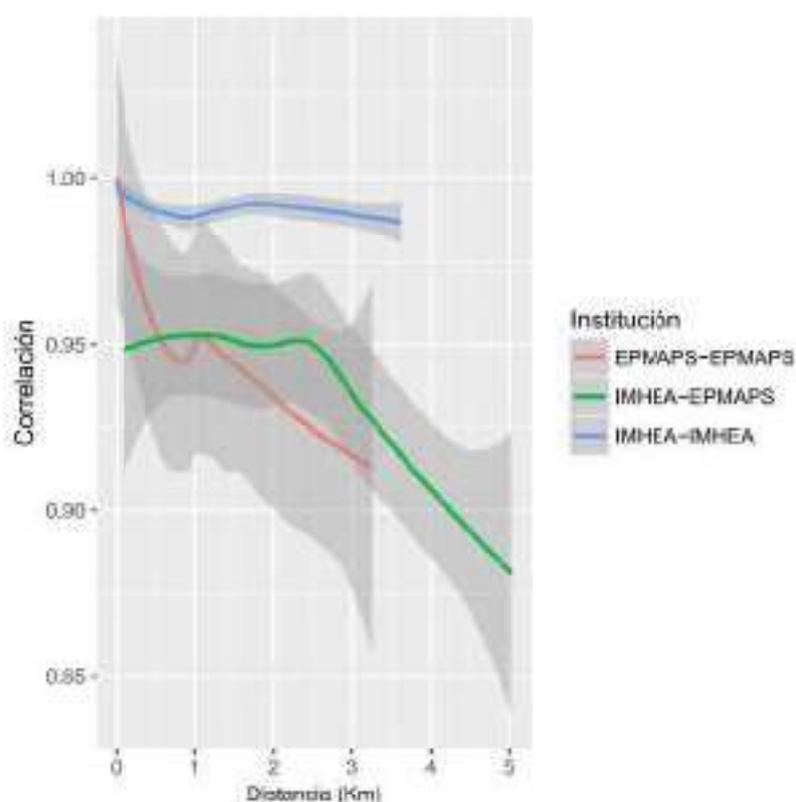
#### 4.3.2.1 Correlograma

Para determinar la estructura espacial se emplea el correlograma, en donde se evalúa la relación entre la distancia y la correlación que existe entre las estaciones pluviométricas. Como ejemplo, se presenta en la Figura 4.75, el correlograma de la subcuenca de Antisana, en donde, observa que para la mayoría de estaciones la correlación es aceptable ( $>0.7$ ) para distancia menores a  $3\text{ km}$ . Cuando se correlacionan estaciones de la misma institución la correlación es aceptable en distancias entre  $3$  y  $4\text{ km}$ . En la Tabla 4.20 se observa que no existe información para correlacionar la estación C09 de EPMAPS con las estaciones pluviométricas pertenecientes a IMHEA por lo que se presenta como NA y cuando se correlaciona con estaciones de la misma institución (C10, P42, P43 y P55), la correlación es menor a  $0.7$ . El resto de estaciones de EPMAPS tienen una correlación alta entre sí por distancias menores a  $3\text{ km}$ . En general, para todas las estaciones pluviométricas de IMHEA la correlación es mayor a  $0.7$  en distancias alrededor de  $3\text{ km}$ . Cuando se correlacionan estaciones de distintas instituciones la correlación disminuye significativamente.

**TABLA 4.20:** Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Antisana

Estación	C09	C10	JTU.01.PT.11	JTU.01.PT.22	JTU.01.PT.32	JTU.01.PT.42	JTU.01.PT.52	JTU.01.PT.63	JTU.01.PT.73	JTU.01.PT.83	P42	P43	P55
C09	-	0.48	1.5	1.72	2.25	0.81	2.19	0.85	0.47	1.37	2.78	1.72	0.9
C10	0.86	-	1.02	1.34	1.77	0.34	1.72	0.38	0.09	1.85	3.25	2.2	1.38
JTU.01.PT.11	0.94	0.88	-	0.23	0.76	0.69	0.70	0.65	1.03	2.86	4.27	3.21	2.4
JTU.01.PT.22	0.91	0.81	0.98	-	0.54	0.91	0.48	0.67	1.25	3.08	4.49	3.44	2.62
JTU.01.PT.32	0.90	0.79	0.97	1.00	-	1.44	0.07	1.41	1.79	3.62	5.03	3.97	3.15
JTU.01.PT.42	0.92	0.81	0.97	0.99	0.99	-	1.38	0.04	0.35	2.18	3.59	2.53	1.71
JTU.01.PT.52	0.94	0.86	0.98	0.97	0.96	0.98	-	1.35	1.73	3.56	4.97	3.91	3.09
JTU.01.PT.63	0.93	0.85	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	-	0.39	2.21	3.62	2.57	1.75
JTU.01.PT.73	0.94	0.86	0.97	0.96	0.96	0.98	0.97	0.99	-	1.83	3.24	2.18	1.37
JTU.01.PT.83	0.94	0.87	0.97	0.96	0.96	0.97	0.97	0.99	0.99	-	1.41	0.37	0.48
P42	0.79	0.78	0.76	0.88	0.65	0.69	0.78	0.72	0.74	0.75	-	1.06	1.88
P43	0.85	0.85	0.85	0.79	0.77	0.79	0.85	0.83	0.84	0.85	0.83	-	0.62
P55	0.86	0.93	0.91	0.87	0.85	0.86	0.90	0.89	0.89	0.90	0.72	0.84	-

ELABORADO POR: Christian Díaz

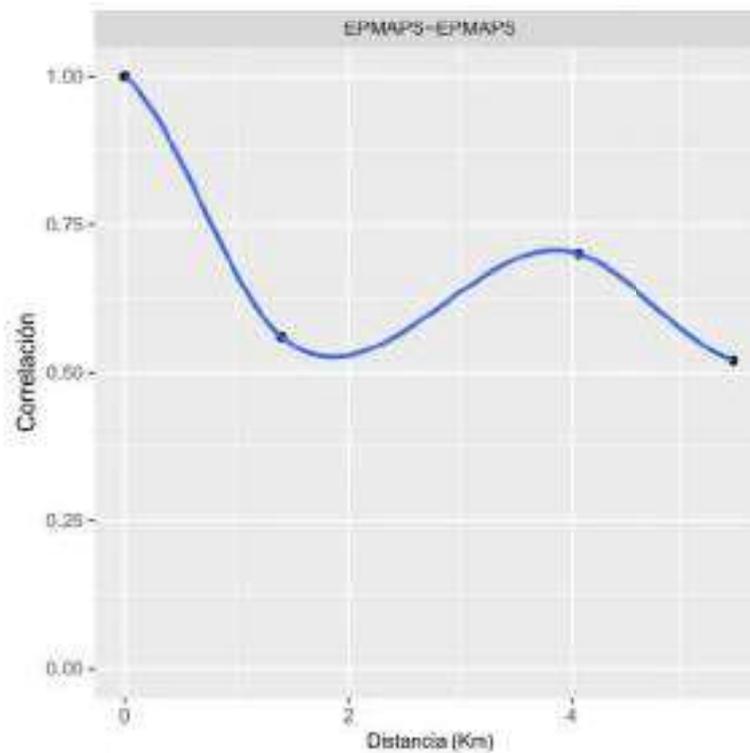

**FIGURA 4.75:** Correlograma para la subcuenca Antisana  
 ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Tabla 4.21 se visualiza que existen únicamente 3 pluviómetros pertenecientes a EP-MAPS. No se presentan valores de correlación mayores a 0.7, sin embargo, el valor más alto es 0.63 para una distancia de 5.47 *km*. Para visualizar la tendencia que tiene un correlograma de Chalpi Grande, se toman los valores de la Tabla 4.21, donde se determina que la correlación es aceptable ( $>0.7$ ) para distancias alrededor de 3 *km* (Figura 4.76).

**TABLA 4.21:** Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Chalpi Grande

Estación	P44	P46	P64
P44	-	4.07	5.47
P46	0.45	-	1.4
P64	0.63	0.5	-

ELABORADO POR: Christian Díaz



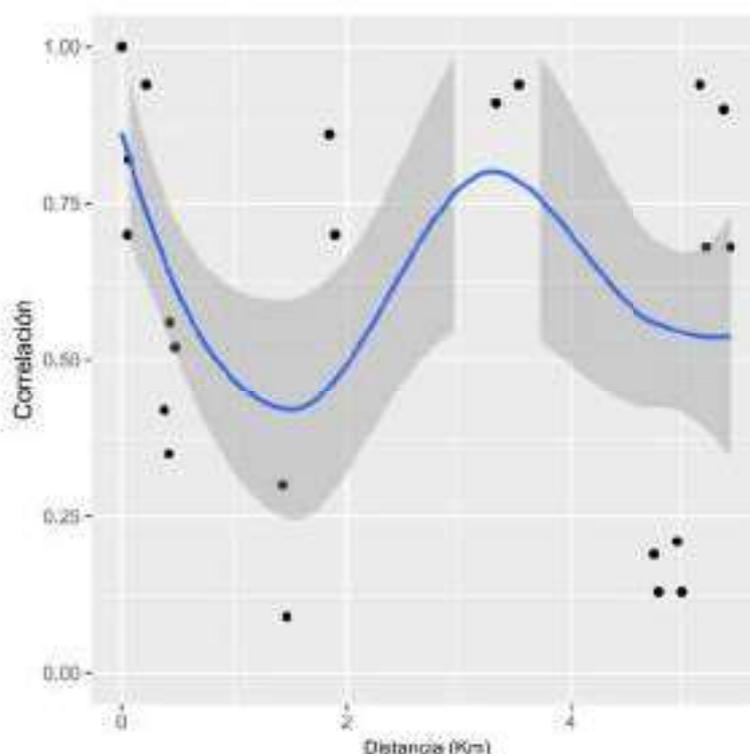
**FIGURA 4.76:** Correlograma para la subcuenca Chalpi Grande  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Tabla 4.22, para la subcuenca del Cinto se observa que existe una alta correlación en estaciones que están separadas por menos de 0.5 km (LLO.01.PO.01 , LLO.01.PO.02 , LLO.02.PO.01 , LLO.02.PO.02) que pertenecen a IMHEA. Sin embargo, también existen estaciones de otras instituciones que presentan una correlación aceptable a pesar de estar separadas distancias alrededor de 5 km. En general, se observa que existe una alta correlación entre todas las estaciones pertenecientes a esta subcuenca (Figura 4.77).

**TABLA 4.22:** Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Cinto

Estación	LLO.01.PO.01	LLO.01.PO.02	LLO.02.PO.01	LLO.02.PO.02	M0354	P29	P30
LLO.01.PO.01	-	0.05	0.48	0.42	4.76	4.97	1.43
LLO.01.PO.02	0.88	-	0.43	0.38	4.8	5.01	1.47
LLO.02.PO.01	0.89	0.98	-	0.06	5.23	5.44	1.9
LLO.02.PO.02	0.98	0.93	0.94	-	5.17	5.38	1.85
M0354	0.78	0.89	0.67	0.81	-	0.22	3.33
P29	0.96	0.88	0.87	0.94	0.86	-	3.54
P30	0.95	0.86	0.85	0.94	0.92	0.91	-

ELABORADO POR: Christian Díaz

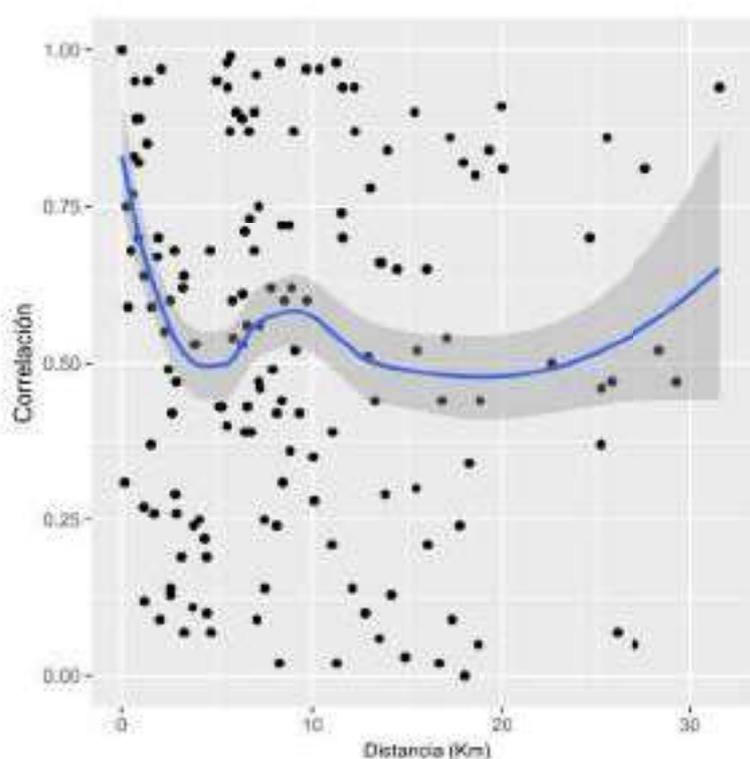
**FIGURA 4.77:** Correlograma para la subcuenca Cinto  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En el caso de la subcuenca de Guayllabamba Medio se presenta una mayor variabilidad, en donde para estaciones que incluso se encuentran a una distancia  $< 5$  km la correlación disminuye significativamente (Figura 4.78). Se determina que la correlación es aceptable ( $< 0.7$ ) cuando la distancia está entre 2 y 3 km para estaciones pertenecientes a la subcuenca de Guayllabamba Medio.

**TABLA 4.23:** Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Guayllabamba Medio

Estación	C02	C03	C07	CARAPUNGO	COTOCOLLAO	M0337	M0339	M0358	M0361	M1200	P03	P05
C02	-	1.9	9.14	10.85	4.48	16.09	16.47	2.79	3.93	9.74	1.2	3.27
C03	0.54	-	7.24	8.15	2.59	14.19	17.37	0.89	5.83	7.85	0.7	1.38
C07	0.67	0.49	-	0.92	4.66	6.95	24.61	6.36	13.07	0.61	7.94	5.87
CARAPUNGO	0.74	0.67	0.68	-	5.57	6.04	25.52	7.27	13.98	0.32	8.85	6.78
COTOCOLLAO	0.81	0.86	0.74	0.84	-	11.6	19.95	1.7	8.41	5.25	3.28	1.21
M0337	0.65	0.72	0.65	0.7	0.78	-	31.56	13.1	20.02	6.34	14.89	12.81
M0339	0.64	0.59	0.60	0.66	0.69	0.72	-	18.25	11.54	25.22	16.67	10.74
M0358	0.7	0.67	0.77	0.72	0.76	0.74	0.72	-	6.71	6.96	1.59	0.5
M0361	0.78	0.84	0.69	0.81	0.87	0.8	0.75	0.8	-	13.68	5.13	7.21
M1200	0.6	0.67	0.66	0.69	0.72	0.71	0.63	0.7	0.78	-	8.54	6.47
P03	0.77	0.78	0.57	0.65	0.75	0.6	0.6	0.6	0.7	0.57	-	2.07
P05	0.61	0.73	0.53	0.83	0.91	0.62	0.64	0.73	0.81	0.59	0.72	-

ELABORADO POR: Christian Díaz



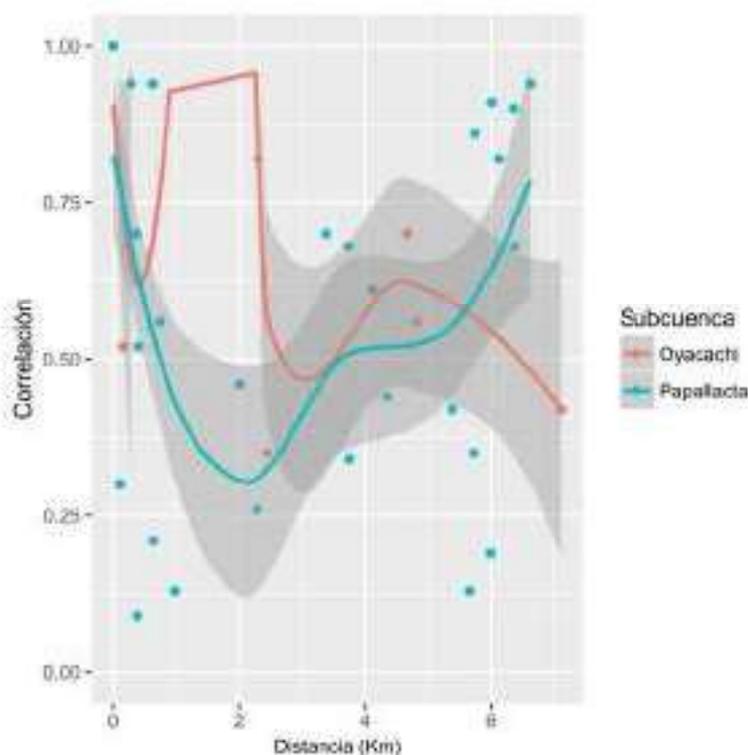
**FIGURA 4.78:** Correlograma para la subcuenca Guayllabamba Medio  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Tabla 4.24 se presenta la correlación entre las estaciones pluviométricas de Oyacachi y Papallacta, donde se visualizan correlaciones entre 0.2 y 0.9 para distancias menores a 7 km. Para Oyacachi, la correlación más alta (0.94) se da entre P68 y P37 separados por 2.3 km. En Papallacta, la correlación más alta es 0.82 entre M5025 y M5024 separados 0.28 km. En la Figura 4.79 se observa que el correlograma es muy variable, pero en general, se determina que la correlación es aceptable para distancias menores a 2 km.

**TABLA 4.24:** Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Oyacachi y Papallacta

Estación	C13	M5021	P37	P68	M0188	M5022	M5023	M5024	M5025	P34	P62	P65
C13	-	4.86	0.15	2.45	0.87	0.53	1.26	4.86	5.13	1.5	0.9	2.86
M5021	0.1	-	4.82	7.11	3.6	4.14	3.41	9.53	9.79	3.17	3.78	7.52
P37	NA	0.49	-	2.3	1.02	0.68	1.42	4.71	4.97	1.65	1.05	2.7
P68	0.41	0.46	0.94	-	3.32	2.98	3.71	2.41	2.68	4.00	3.30	0.43
M0188	1	0.52	0.65	0.64	-	0.35	0.4	5.72	5.99	0.63	0.1	3.72
M5022	0.47	0.51	0.47	0.54	0.86	-	0.74	5.38	5.65	0.98	0.38	3.38
M5023	0.29	0.67	0.4	0.5	0.68	0.73	-	6.12	6.38	0.24	0.38	4.11
M5024	0.32	0.84	0.44	0.57	0.47	0.6	0.68	-	0.28	6.36	5.74	2.01
M5025	0.5	0.82	0.42	0.44	0.37	0.45	0.61	0.82	-	6.62	6.01	2.28
P34	0.09	0.58	0.56	0.57	0.71	0.67	0.77	0.89	0.5	-	0.62	4.35
P62	0.18	0.7	0.5	0.59	0.6	0.77	0.58	0.79	0.63	0.72	-	3.74
P65	0.43	0.15	0.57	0.62	0.34	0.34	0.29	0.6	0.17	0.37	0.57	-

ELABORADO POR: Christian Díaz



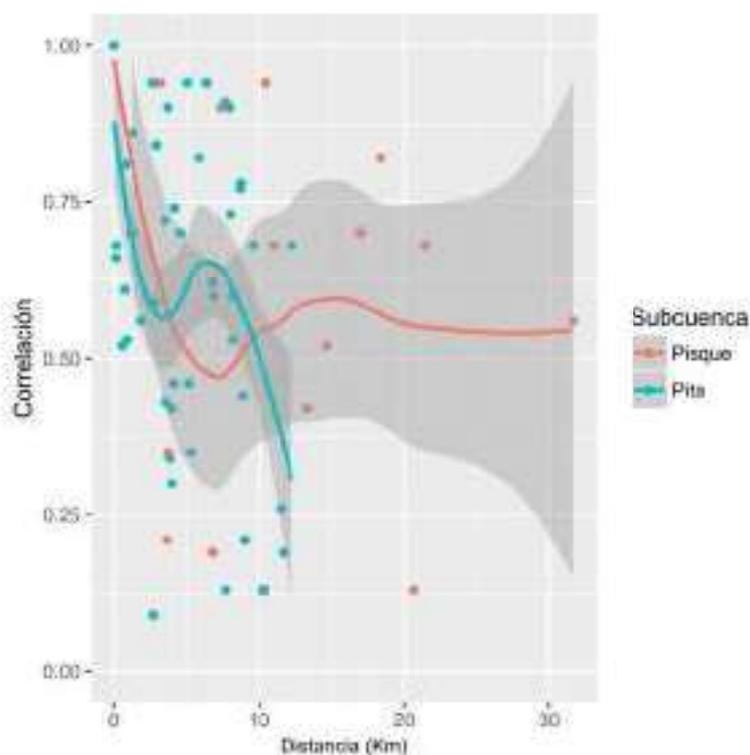
**FIGURA 4.79:** Correlograma para la subcuenca Oyacachi y Papallacta  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Tabla 4.25 se presenta la correlación entre las estaciones pluviométricas de Pisque y Pita, donde se visualizan correlaciones entre 0.2 y 0.9 para distancias menores a 45 *km*. Para Pisque, la correlación más alta (0.88) se da entre M1094 y M0111 separados por 11.02 *km*. En Pita, la correlación más alta es 0.89 entre M5026 y M0364 separados 1.89 *km*. En la Figura 4.80 se observa que el correlograma es muy variable, pero en general, se determina que la correlación es aceptable para distancias menores a 3 *km* para las subcuencas de Pisque y Pita.

**TABLA 4.25:** Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca Pisque y Pita

Estación	M0009	M0023	M0111	M0344	M0350	M1094	C11	M0364	M5026	M5028	M5029	M5030	M5076
M0009	-	17.02	14.67	3.71	6.81	3.65	26.49	25.17	27.06	21.2	14.81	17.46	22.49
M0023	0.61	-	31.69	13.31	10.21	20.67	43.52	42.19	44.68	38.22	31.83	34.40	39.51
M0111	0.87	0.72	-	18.38	21.48	11.02	11.83	10.51	12.39	6.53	0.28	2.8	7.82
M0344	0.74	0.64	0.76	-	3.1	7.37	30.21	28.89	30.77	24.91	18.52	21.17	26.2
M0350	0.59	0.65	0.62	0.54	-	10.46	33.3	31.98	33.87	28	21.62	24.27	29.29
M1094	0.87	0.71	0.88	0.76	0.7	-	22.84	21.52	23.41	17.54	11.16	13.81	18.04
C11	0.76	0.53	NA	0.36	0.5	0.75	-	1.32	0.57	5.3	11.69	9.03	4.01
M0364	0.74	0.7	0.71	0.66	0.64	0.79	0.74	-	1.09	3.96	10.36	7.71	2.69
M5026	0.64	0.65	0.71	0.49	0.58	0.69	0.44	0.89	-	5.87	12.25	9.6	4.58
M5028	0.57	0.52	0.56	0.47	0.37	0.61	0.63	0.67	0.55	-	6.39	3.73	1.3
M5029	0.56	0.5	NA	0.46	0.45	0.67	0.37	0.62	0.53	0.77	-	2.65	7.68
M5030	0.63	0.52	NA	0.25	0.51	0.69	0.73	0.71	0.51	0.69	0.58	-	5.03
M5076	0.51	0.59	NA	0.3	0.32	0.49	0.33	0.55	0.72	0.52	0.53	0.22	-

ELABORADO POR: Christian Díaz



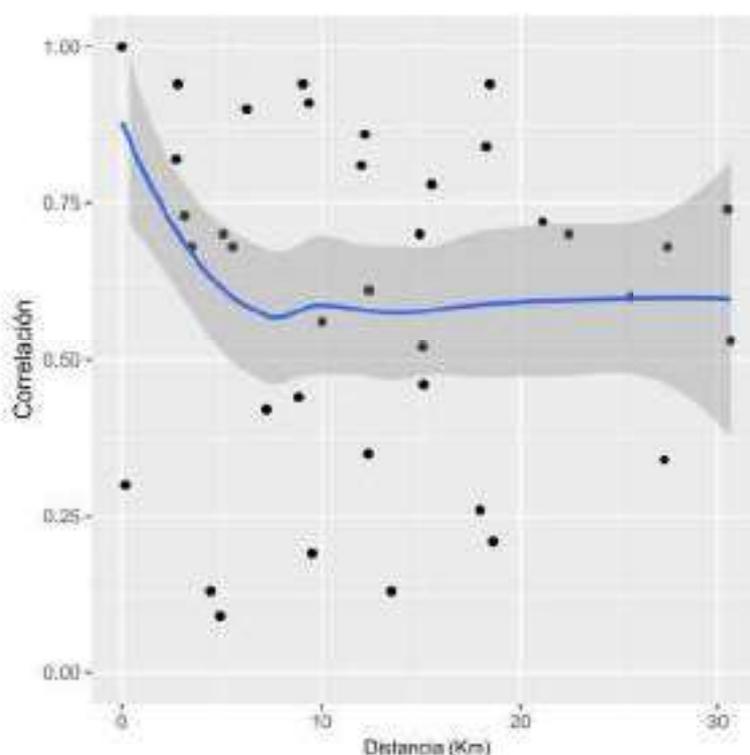
**FIGURA 4.80:** Correlograma para la subcuenca Pisque y Pita  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Tabla 4.26 se presenta la correlación entre las 9 estaciones pluviométricas de San Pedro, donde se visualizan correlaciones entre 0.4 y 0.9 para distancias menores a 30 *km*. La correlación más alta (0.98) se da entre M0118 y M0003 separados por 5.57 *km*. La correlación más baja es 0.33 entre M5077 y M0353 separados 30.47 *km*. En la Figura 4.81 se observa que la correlación es aceptable para distancias menores a 3 *km* para la subcuenca de San Pedro.

**TABLA 4.26:** Matriz Correlación-Distancia para las estaciones pluviométricas en la subcuenca San Pedro

Estación	C08	LOS.CHILLOS	M0003	M0113	M0118	M0120	M0353	M5027	M5077
C08	-	5.08	15.1	12.35	9.51	16.61	0.17	27.49	30.63
LOS.CHILLOS	0.65	-	10.03	7.27	4.46	13.53	4.42	22.41	25.55
M0003	0.74	0.74	-	2.75	5.57	3.51	14.94	12.39	15.53
M0113	0.75	0.7	0.87	-	2.82	6.26	12.19	15.14	18.26
M0118	0.74	0.74	0.88	0.85	-	9.08	9.37	17.95	21.1
M0120	0.51	0.64	0.79	0.71	0.78	-	18.45	8.88	12.02
M0353	0.49	0.51	0.61	0.62	0.6	0.5	-	27.33	30.47
M5027	0.66	0.71	0.84	0.83	0.84	0.76	0.66	-	3.14
M5077	0.56	0.64	0.73	0.74	0.73	0.66	0.13	0.59	-

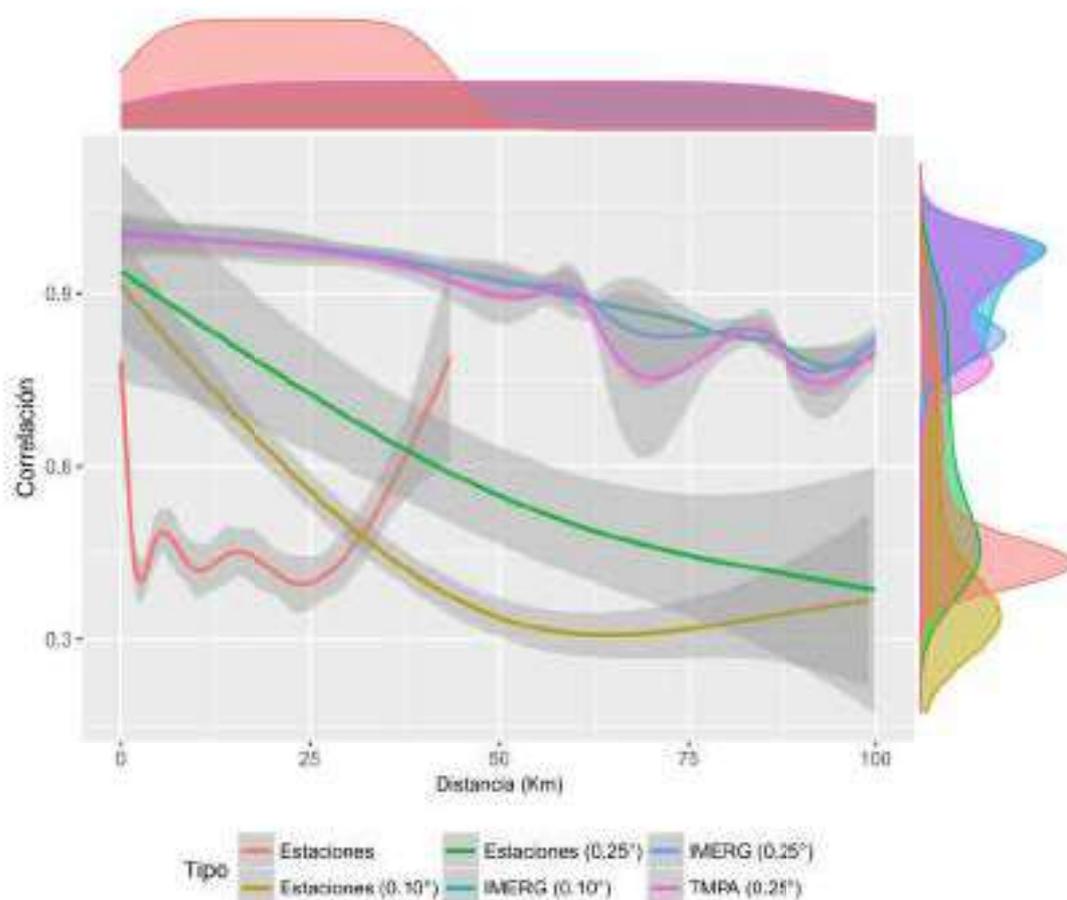
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.81:** Correlograma para la subcuenca San Pedro  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 4.82 se presenta un claro ejemplo de la relación de correlación vs distancia. Se visualiza el correlograma con las estaciones, las estaciones con resolución espacial  $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$  y  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , TMPA con resolución espacial  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  e IMERG con resolución espacial de  $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$  y  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ . La correlación espacial considera todos los píxeles de cada producto satelital; en el caso de las estaciones con resolución espacial de  $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$  y  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , esta correlación es aceptable ( $>0.7$ ) en distancias cercanas a 10 km. Los productos satelitales mantienen una correlación que va disminuyendo a medida que aumenta la distancia, sin embargo, se visualiza que la correlación es mayor a 0.7 en distancias que superan los 50 km. La precipitación observada muestra alta variabilidad a pequeña escala, por lo que existe correlación mayor a 0.7 en distancias entre 1-2 km cuando

se relacionan las 131 estaciones. La correlación espacial considera todos los píxeles de cada producto satelital para TMPA e IMERG; en el caso de las estaciones con resolución espacial de  $0.10^\circ$  y  $0.25^\circ$ , esta correlación es buena ( $>0.7$ ) en distancias cercanas a  $10 \text{ km}$ .



**FIGURA 4.82:** Correlación espacial para cada producto a distintas resoluciones espaciales  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En la Figura 4.27 se presenta el radio de influencia obtenido de los correlogramas para las distintas subcuencas en la zona de estudio. Se observa que la subcuencas de San Pedro es la única subcuencas que se ajusta a la teoría de radio de influencia igual a  $5 \text{ km}$  y correlación mayor a  $0.7$ . El resto de subcuencas presentan un radio de influencia cercano a  $1 \text{ km}$ , que se puede emplear como criterio para localizar o reubicar estaciones pluviométricas dentro del área estudiada.

TABLA 4.27: Radio de Influencia por subcuenca

Subcuenca	Tipo de Régimen	Rango Radio de Influencia (km)
ANTISANA	Transición	1
CHALPI GRANDE	Unimodal	1
CINTO	Bimodal	2
GUAYLLABAMBA ALTO	Bimodal	1
GUAYLLABAMBA MEDIO	Bimodal	1.5
MINDO	Bimodal	3
OYACACHI	Unimodal	3
PAPALLACTA	Unimodal	1
PISQUE	Bimodal	4
PITA	Bimodal	1
QUIJOS	Transición	1
SAN PEDRO	Bimodal	5
TAMBOYACU	Unimodal	1

ELABORADO POR: Christian Díaz

#### 4.3.2.2 Semivariograma

En la Figura 4.83 se presenta como ejemplo un variograma para las estaciones pluviométricas ( $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$  y  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) y los productos satelitales IMERG v3 y TMPA v7 sin corregir, correspondiente al mes de enero. Se visualiza que, a medida que la distancia aumenta, la varianza va creciendo con diferentes modelos de semivariograma. Para realizar la comparación entre los semivariogramas se determina la varianza a una distancia de  $3\text{ km}$ , que corresponde a la distancia en que la correlación es mayor a  $0.7$ . Los productos satelitales en distintas resoluciones muestran una varianza casi nula a una distancia de  $3\text{ km}$ . Las estaciones pluviométricas tiene varianza entre  $500$  y  $1000$  a  $3\text{ km}$ , pero cuando se tiene estaciones con resolución espacial  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  la varianza sobrepasa estos valores.

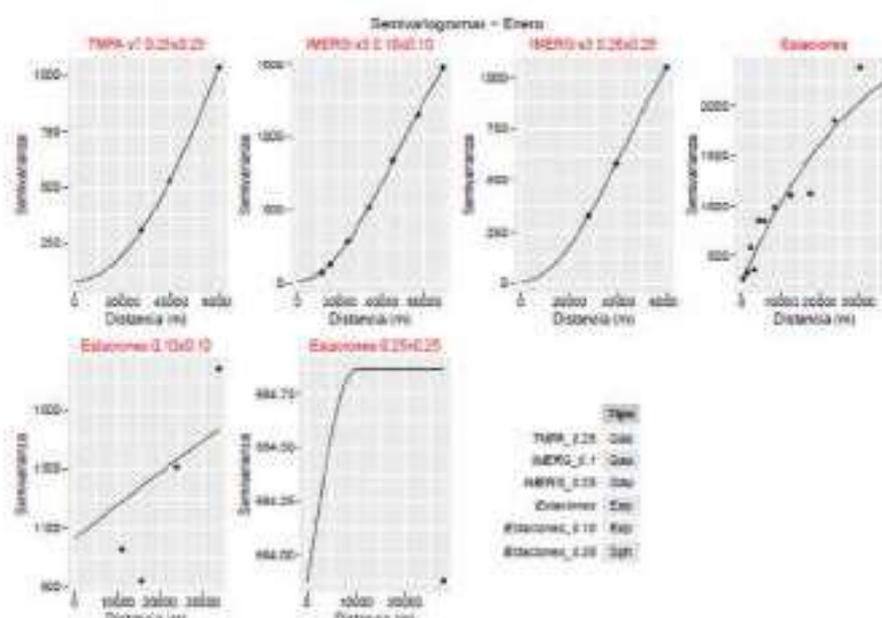


FIGURA 4.83: Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Enero  
ELABORADO POR: Christian Díaz

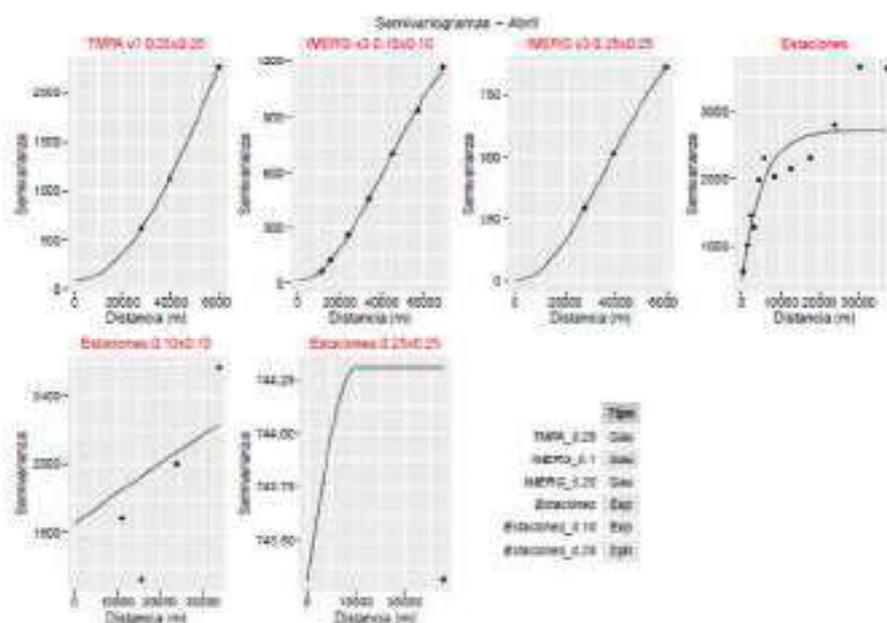


FIGURA 4.84: Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Abril  
ELABORADO POR: Christian Díaz

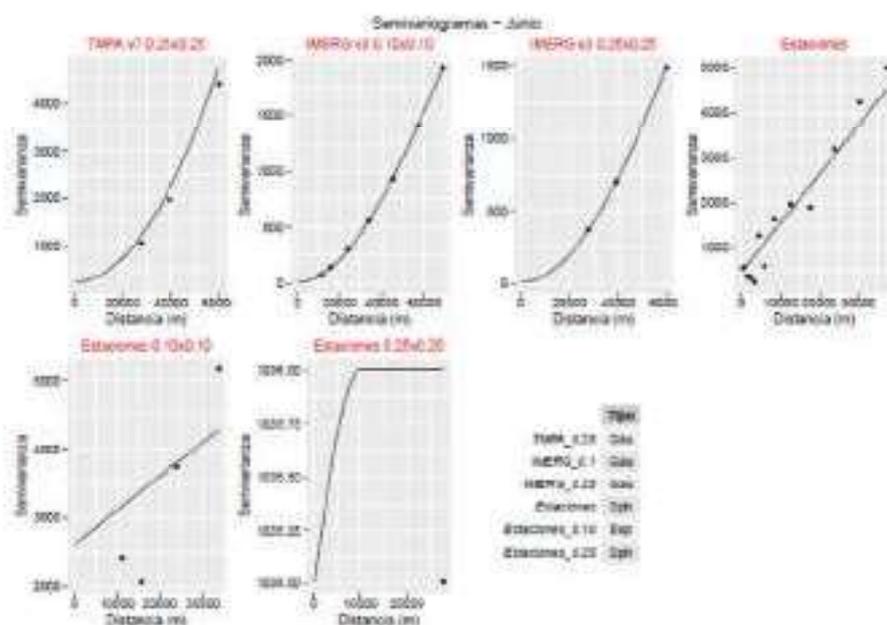
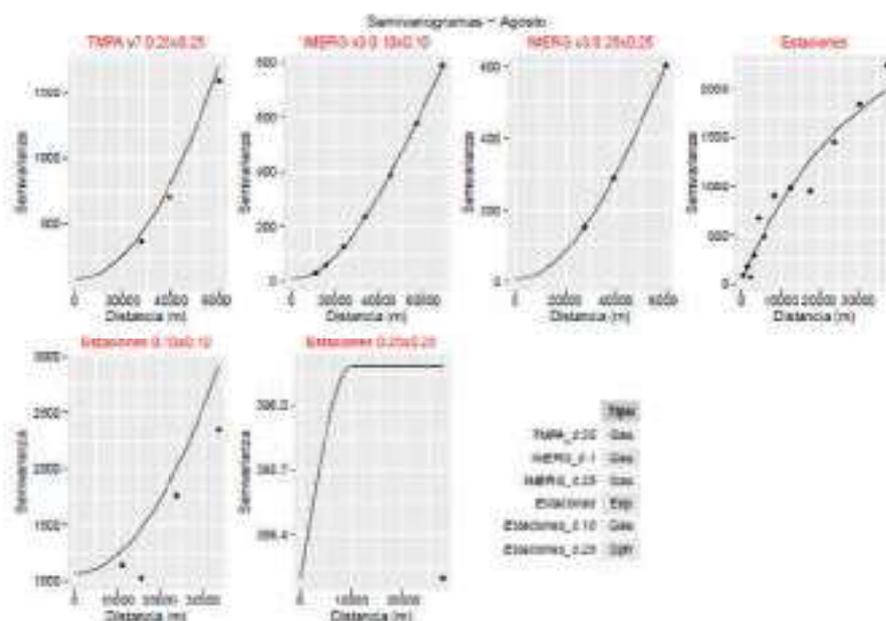


FIGURA 4.85: Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Junio  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.86:** Semivariograma de los productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 para el mes de Agosto  
ELABORADO POR: Christian Díaz

En general para los productos satelitales TMPA v3 e IMERG v7 esta varianza permanece constante y es cercana a 0 para todos los meses hasta que sobrepasa los 5-10 *km*, como se observa en las demás figuras (Figura 4.83 - Figura 4.86). Por esta razón, se determina que las estaciones pluviométricas se correlacionan de manera aceptable ( $r > 0.7$ ) y presentan la varianza más pequeña para distancias menores a 3 *km*.

### 4.3.3 FUSIÓN DE PRODUCTOS SATELITALES Y GENERACIÓN DE ISOYETAS

La corrección de las estimaciones satelitales de precipitación de los productos TMPA v7 e IMERG v3 se realizó a los grids de cada mes en el periodo 1998-2016, con las metodologías no paramétricas de corrección de precipitación: Mean Bias Correction (MBC), Double Kernel Smoothing (DS), Bayesian Combination (BC) y Kriging External Drifting (KED). Los resultados de los métodos de corrección fueron generados en R y guardados en un archivo *.Rdata*, *.txt* o *.csv*, para luego ser cargado y almacenado. Los 228 archivos han sido evaluados y posteriormente pueden ser cargados, para la generación de mapas a nivel mensual.

Es importante recalcar que para utilizar el método de corrección KED es necesario demostrar la normalidad de los datos observados. Por ello, a continuación se presenta gráficamente en la Figura 4.87 y Figura 4.88, que los datos tienen normalidad, pues presentan valores de  $p > 0.05$  y un valor de asimetría cercano a 0.

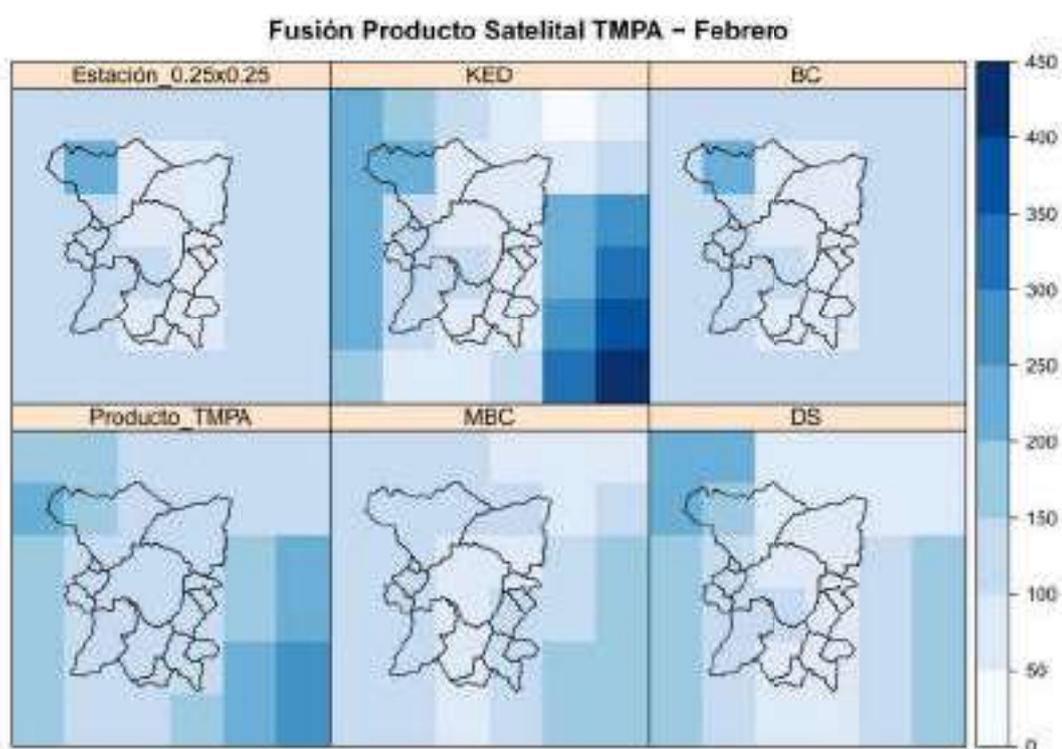


**FIGURA 4.87:** Distribución Normal para observaciones de pluviómetros correspondientes al mes de abril  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.88:** Distribución Normal para observaciones de pluviómetros correspondientes al mes de octubre  
ELABORADO POR: Christian Díaz

Para una visualización y comparación más general, en la Figura 4.89 se presenta la diferencia entre la estimación satelital sin corregir (Producto TMPA), las estimaciones de los pluviómetros (Estación  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) y las correcciones con los métodos descritos anteriormente.



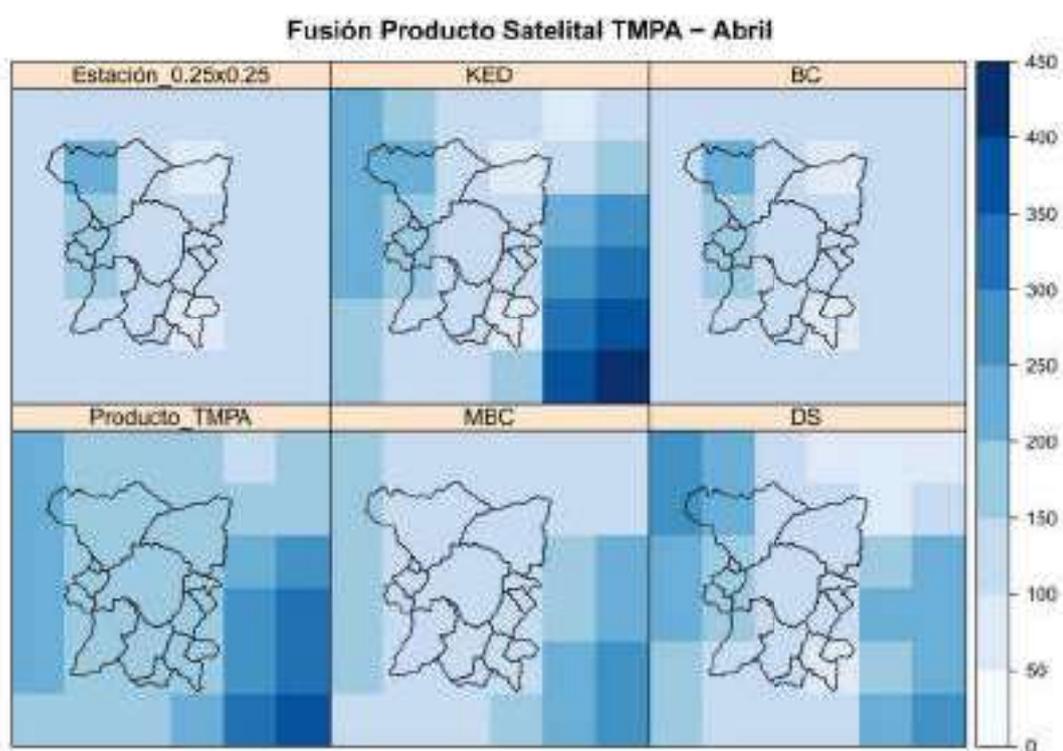
**FIGURA 4.89:** Producto TMPA corregido por KED, BC, MBC, DS para Febrero. Estación  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto TMPA (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing)

ELABORADO POR: Christian Díaz

Las demás imágenes correspondientes a los meses de Enero a Diciembre para el producto TMPA v7 e IMERG v3 corregidos, se encuentran en el Anexo 11 y Anexo 12.

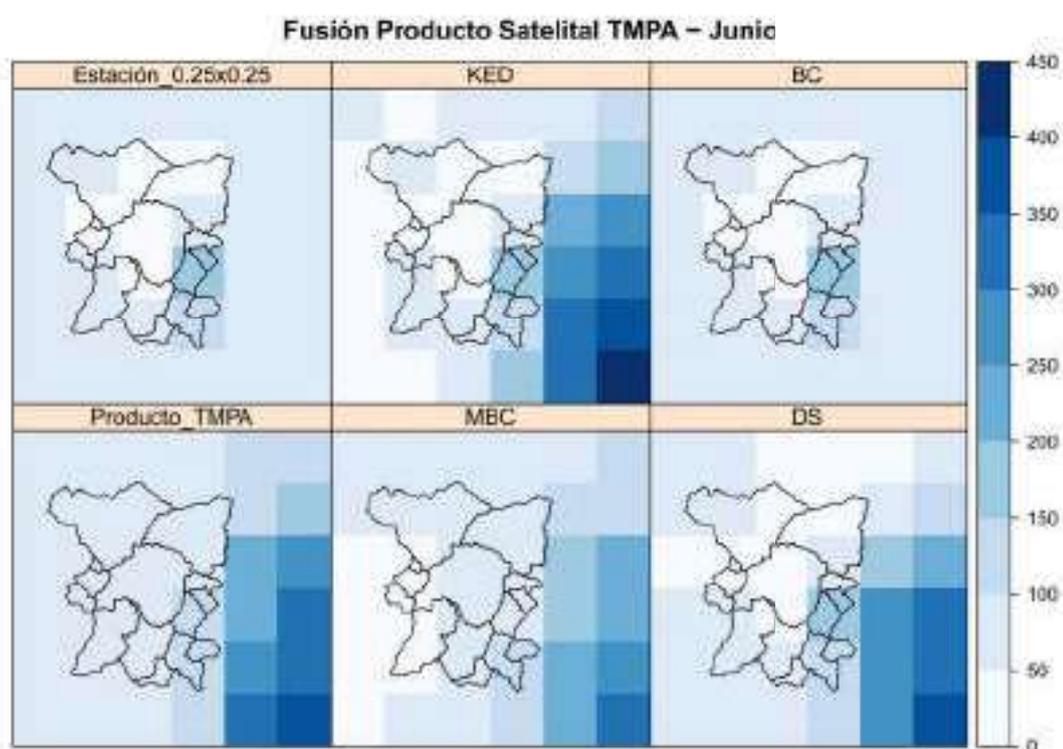
#### 4.3.3.1 TMPA v7 corregido

Se presentan los mapas de la distribución espacial de precipitación obtenido a partir de la precipitación satelital corregida por los distintos métodos de corrección. Los mapas de precipitación satelital TMPA v7 corregido para los distintos rellenos constan en el Anexo 11. A continuación se presentan algunas imágenes corregidas tomando como base el relleno con Regresión Lineal Simple, que ha producido los menores errores ( Figura 4.90, Figura 4.91 ).



**FIGURA 4.90:** Producto TMPA corregido por KED, BC, MBC, DS para Abril. Estación  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto TMPA (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing)

ELABORADO POR: Christian Díaz

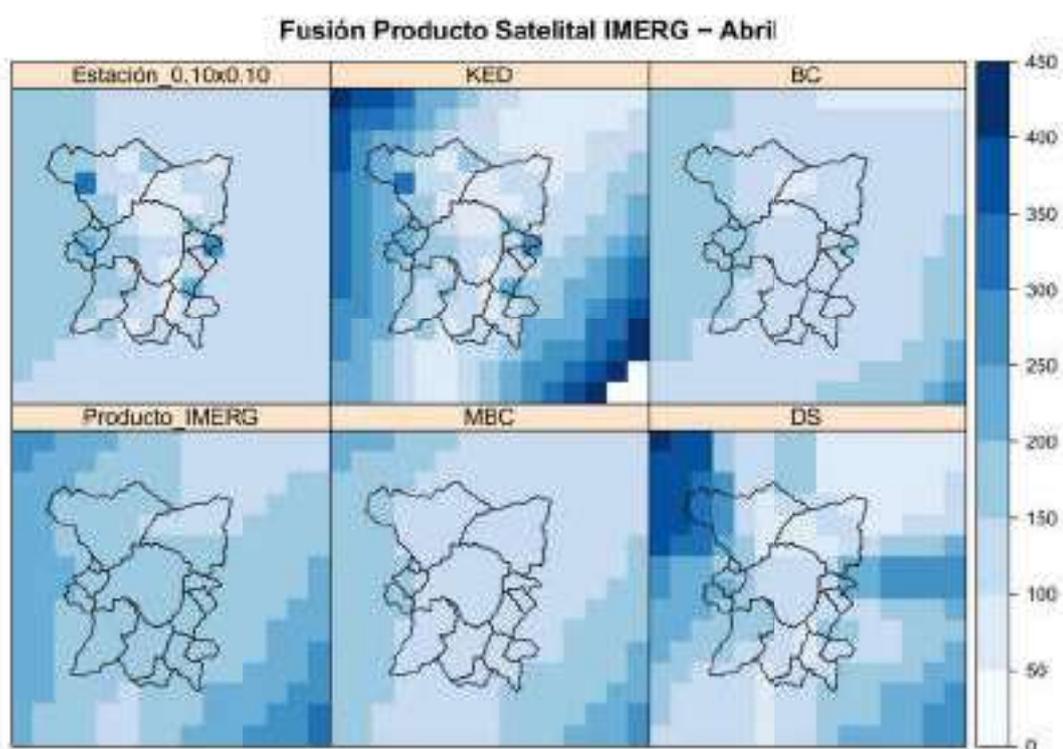


**FIGURA 4.91:** Producto TMPA corregido por KED, BC, MBC, DS para Junio, Estación  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto TMPA (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing)

ELABORADO POR: Christian Díaz

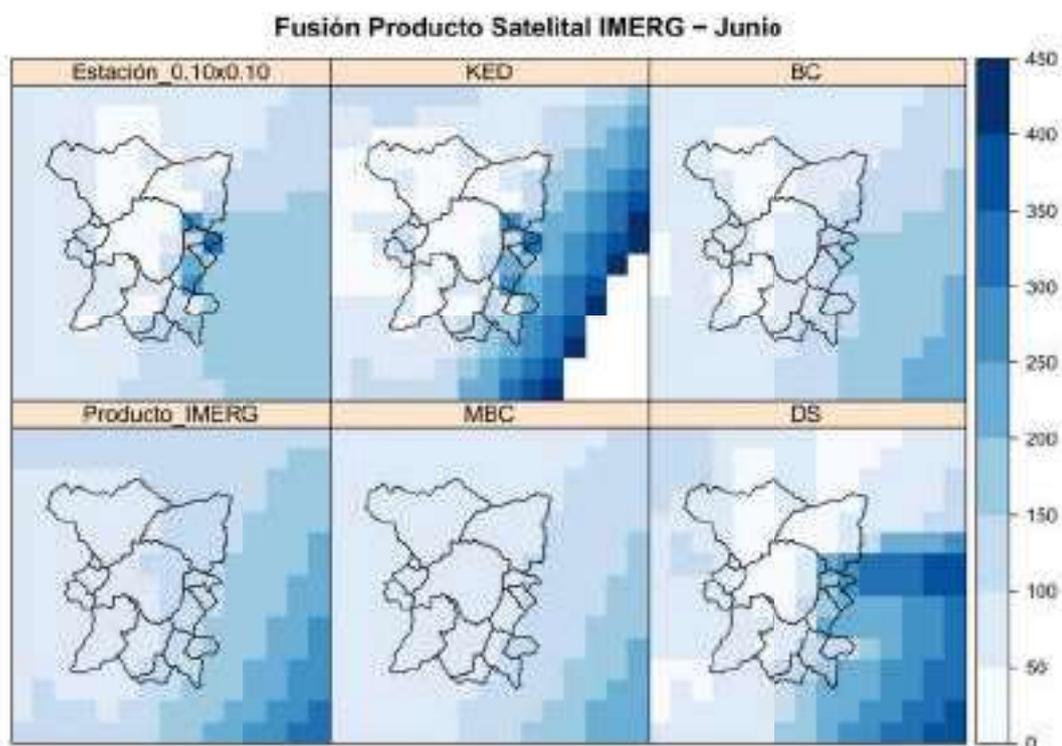
#### 4.3.3.2 IMERG v3 corregido

Se presentan las imágenes corregidas de la distribución espacial de precipitación obtenido a partir de la precipitación satelital corregida por los distintos métodos de corrección que constan en el Anexo 12. A continuación se presentan algunas imágenes corregidas tomando como base el relleno con Regresión Lineal Simple, que ha producido los menores errores ( Figura 4.92, Figura 4.93 ).



**FIGURA 4.92:** Producto IMERG corregido por KED, BC, MBC, DS para Abril, Estación  $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$  (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto IMERG (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing)

ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.93:** Producto IMERG corregido por KED, BC, MBC, DS para Junio. Estación  $0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$  (Kriging Ordinario para observaciones de pluviómetros), Producto IMERG (producto satelital sin corregir), KED (Kriging with external drift), MBC (Mean Bias Correction), BC (Bayesian Combination), DS (Double Kernel Smoothing)

ELABORADO POR: Christian Díaz

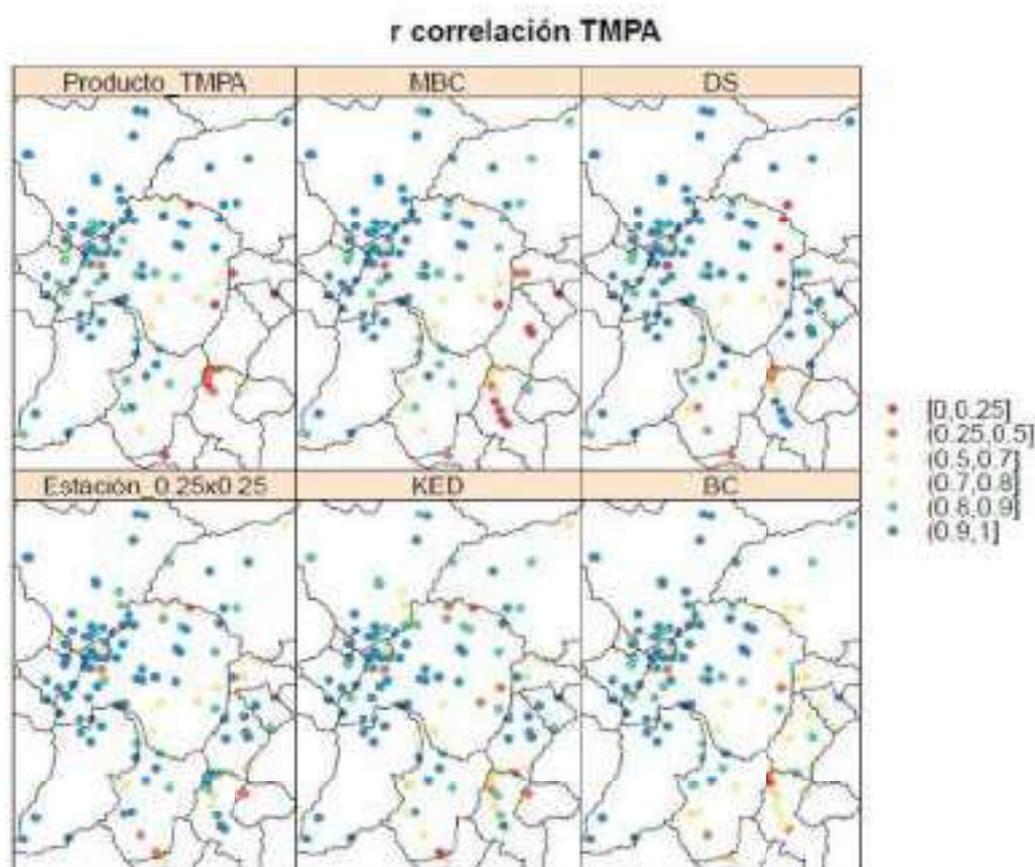
En estas imágenes se puede visualizar el contraste que existe entre una de las épocas de mayor precipitación (abril) y de menor precipitación (junio), tanto TMPA como para IMERG.

#### 4.3.3.3 Resultados de la Validación Cruzada

##### Resultados de la Validación Cruzada con producto satelital TMPA v7

Durante la validación cruzada se determinaron 4 índices: ME, RMSE, MAE y  $r$ . El índice más representativo y con el cual se puede percibir una mejor comparación entre las observaciones de campo y el producto satelital corregido y sin corregir, es el coeficiente de correlación ( $r$ ) siempre y cuando los demás errores sean pequeños. Todos los resultados de la validación cruzada constan en el Anexo 13. En la evaluación del producto satelital TMPA v7 corregido, la correlación en la mayoría de las estaciones es mayor a 0.9. Se observa que para los métodos de corrección BC, MBC y DS existen estaciones que tienen una correlación  $< 0.7$ . Estas estaciones están ubicadas en la zona sureste del área de estudio dentro de las subcuencas de Chalpi Grande, Antisana y Papallacta, donde se cuenta con poca información. Lo mismo sucede si se comparan los datos observados y el producto satelital TMPA denominado Producto TMPA en la Figura 4.94, la correlación es muy pequeña para dichas estaciones. En el caso del producto satelital TMPA v7 corregido, la correlación en la mayoría de las estaciones es mayor a 0.8. Visualmente, existen estaciones con una correlación entre 0.1 y 0.4 para el método de corrección MBC. Estas estaciones están ubicadas dentro de las

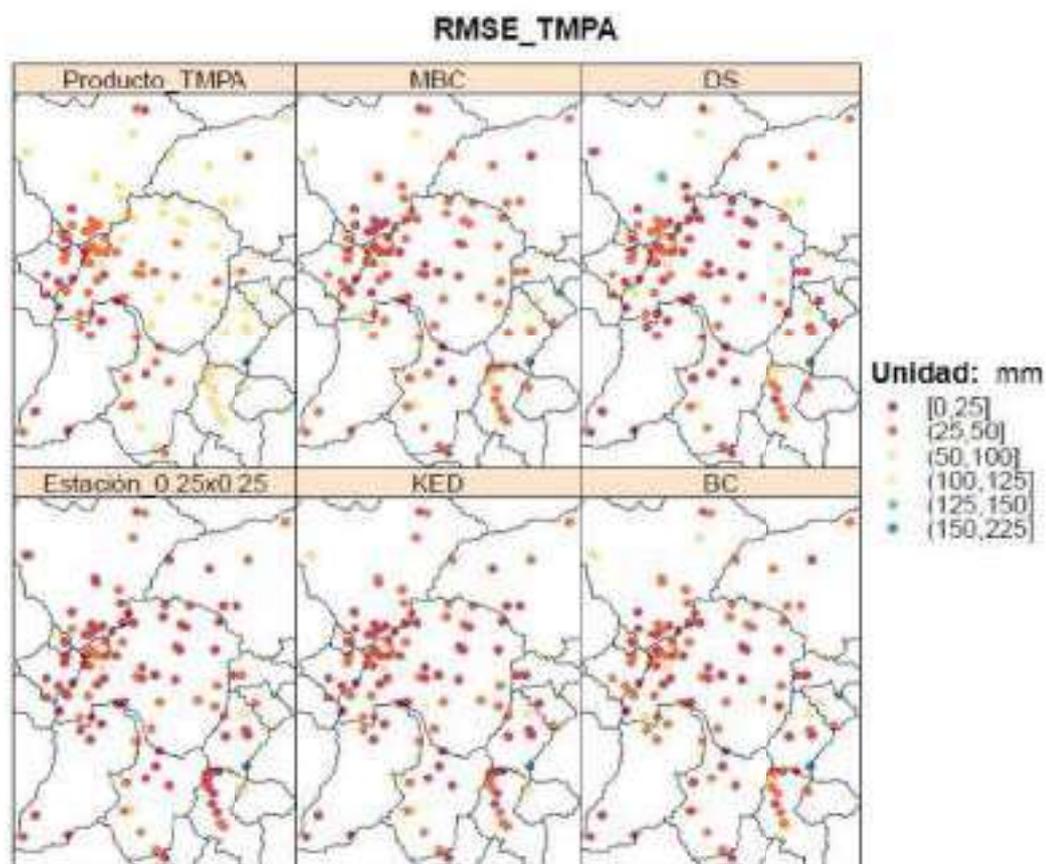
subcuencas de Oyacachi, Antisana y Papallacta. Lo mismo sucede si se comparan los datos observados y el producto satelital TMPA denominado SAT en las Figura 4.94.



**FIGURA 4.94:** Correlación datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

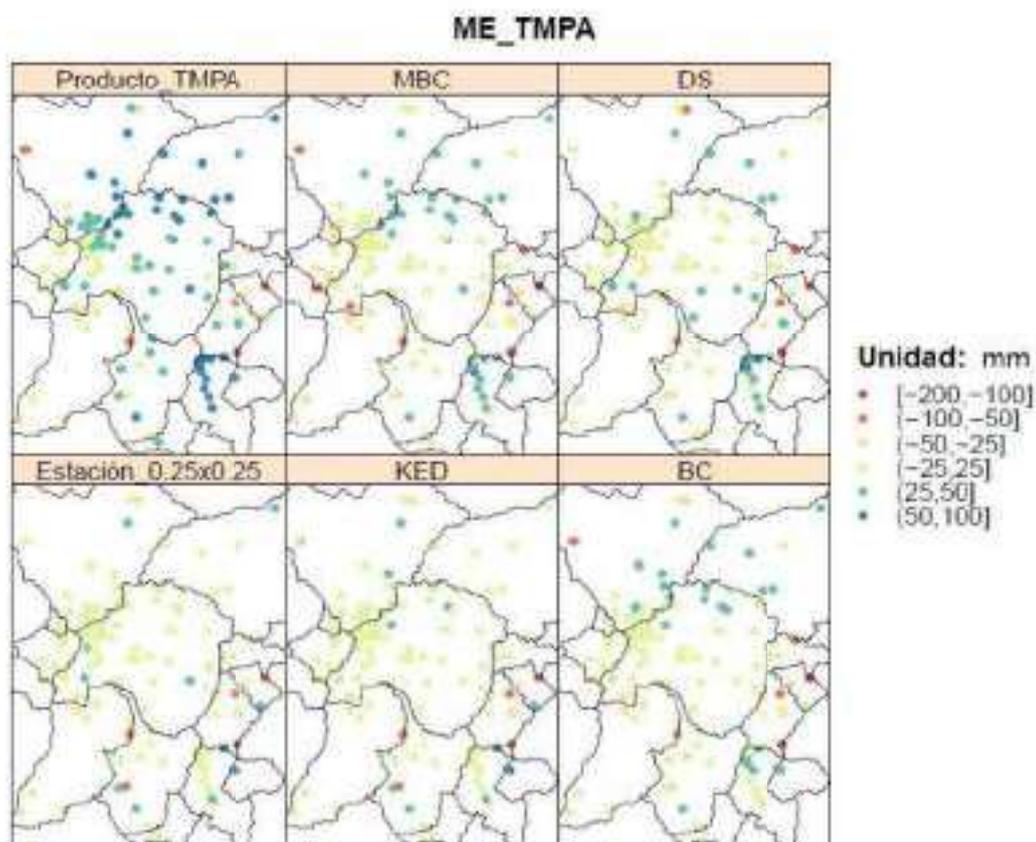
Se puede ver que existen estaciones en la subcuenca Antisana, Papallacta, Quijos, Oyacachi y Chalpi Grande con una correlación muy baja. Para todos los métodos de corrección coincide esta situación que es explicada debido a que en esa zona desde un inicio el satélite no captura el régimen adecuado de precipitación. Para las demás subcuencas existe una correlación alta pero que no satisface hasta no compararla con las demás métricas estadísticas.



**FIGURA 4.95:** RMSE datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

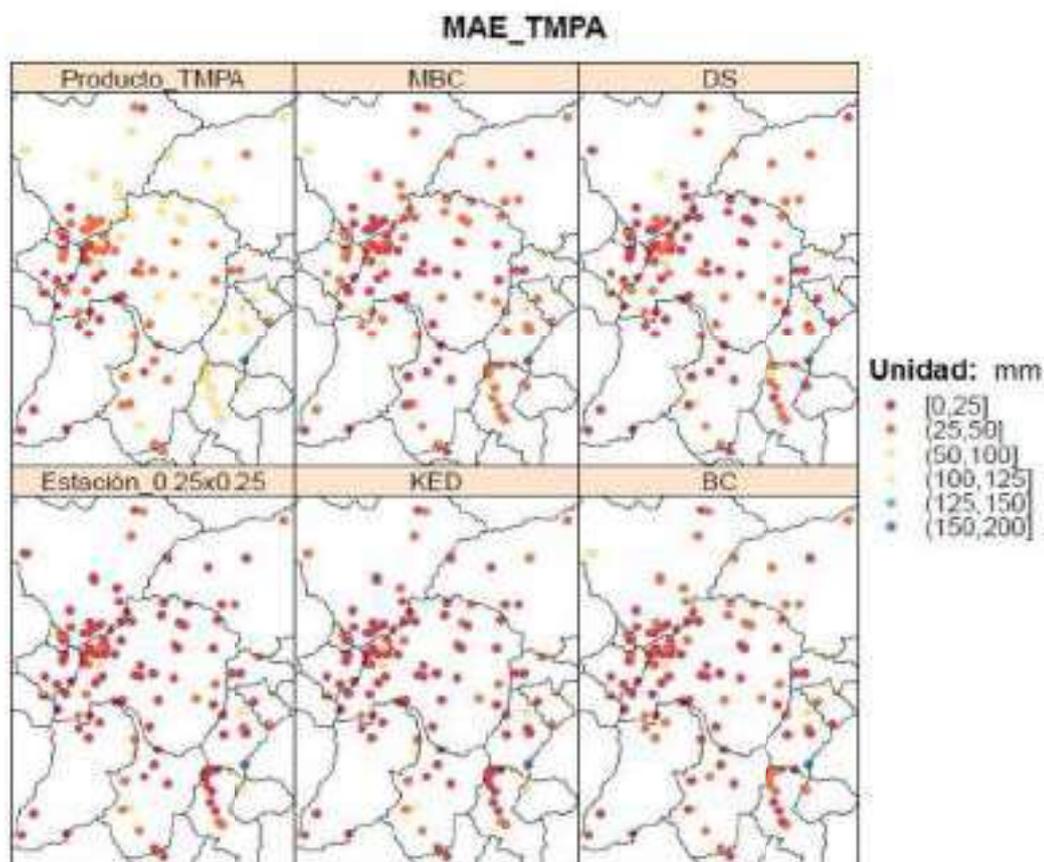
Para casi todas las estaciones el valor de RMSE esta entre 0 y 100 *mm*. Existe una mayor concentración de estaciones con RMSE 0-50 en la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito. Sin embargo también es necesario tomar en cuenta que existe mucha variabilidad del error medio ME para estas mismas estaciones (Figura 4.96).



**FIGURA 4.96:** ME datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

A continuación se puede ver en la Figura 4.97 que los valores de MAE oscilan en su mayoría entre 0 y 75 *mm*, y que existen apenas unas 5 estaciones que sobrepasan este rango.

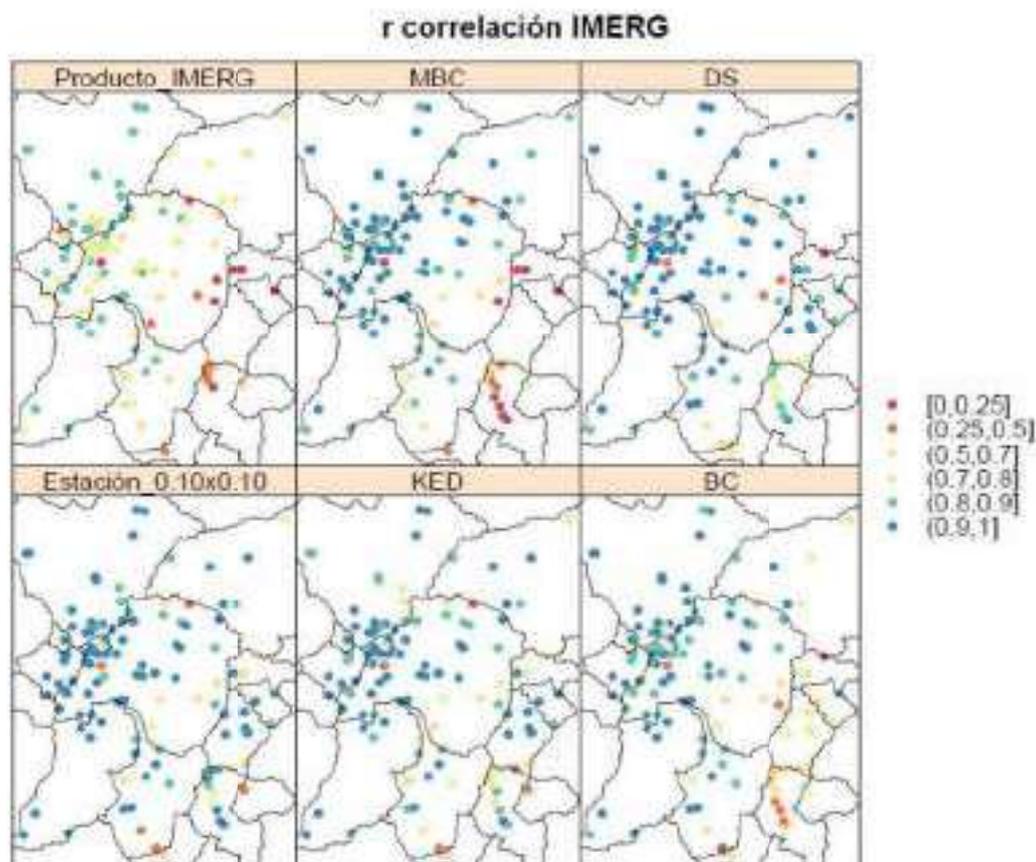


**FIGURA 4.97:** MAE datos observados y producto satelital TMPA v7 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

### Resultados de la Validación Cruzada con producto satelital IMERG v3

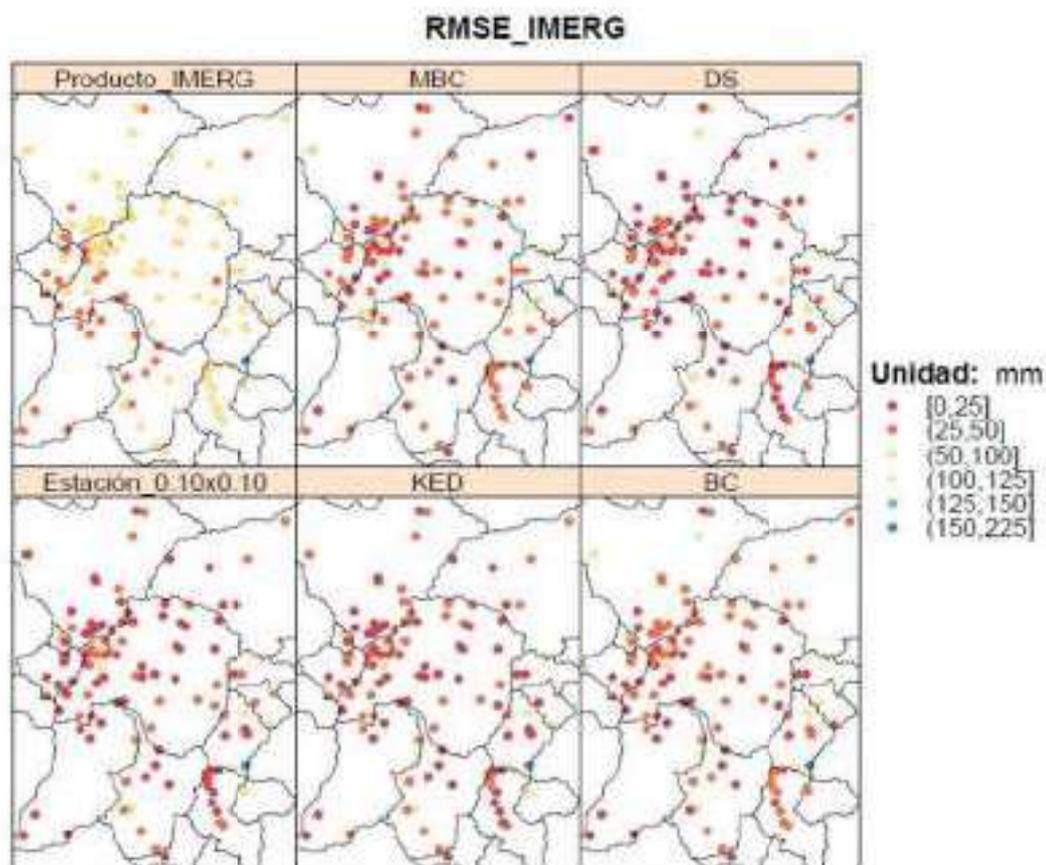
En el caso de IMERG v3 aparecen estaciones con correlación 0.9 en la mayoría de la zona de estudio, sin embargo, existen estaciones pertenecientes a las subcuencas de Papallacta, Quijos, Antisana e inclusive Guayllabamba Medio con correlación menores a 0.7. Esto se justifica debido a la variabilidad de la precipitación en la ciudad, producida por la infraestructura; lo que resulta en condiciones climáticas localizadas (Figura 4.98). Se realizó la validación cruzada tomando como base el relleno por Regresión Lineal Simple. De manera que se obtuvieron las siguientes imágenes.



**FIGURA 4.98:** Correlación datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

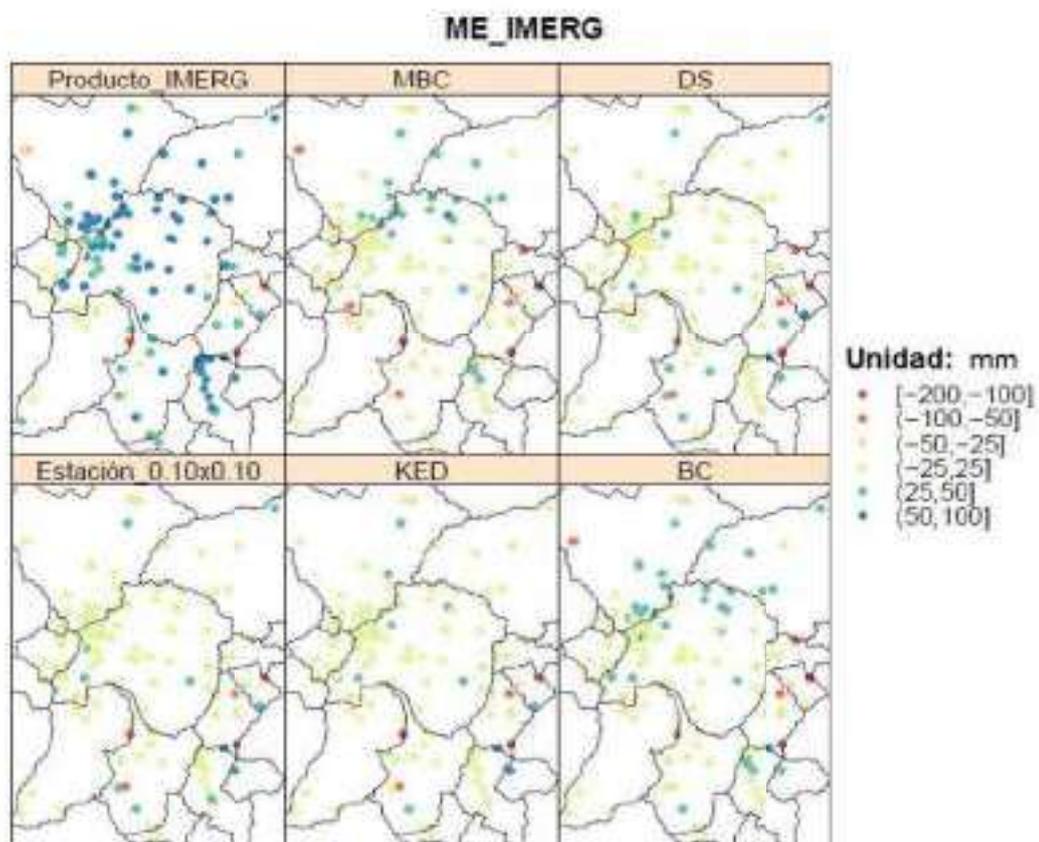
Se puede ver que existen estaciones en la subcuenca Antisana, Papallacta, Quijos, Oyacachi y Chalpi Grande con una correlación muy baja, inclusive en Guayllabamba Alto. Para todos los métodos de corrección coincide esta situación que es explicada debido a que en esa zona desde un inicio el satélite no captura el régimen adecuado de precipitación para algunas estaciones. Para las demás subcuencas existe una correlación alta.



**FIGURA 4.99:** RMSE datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

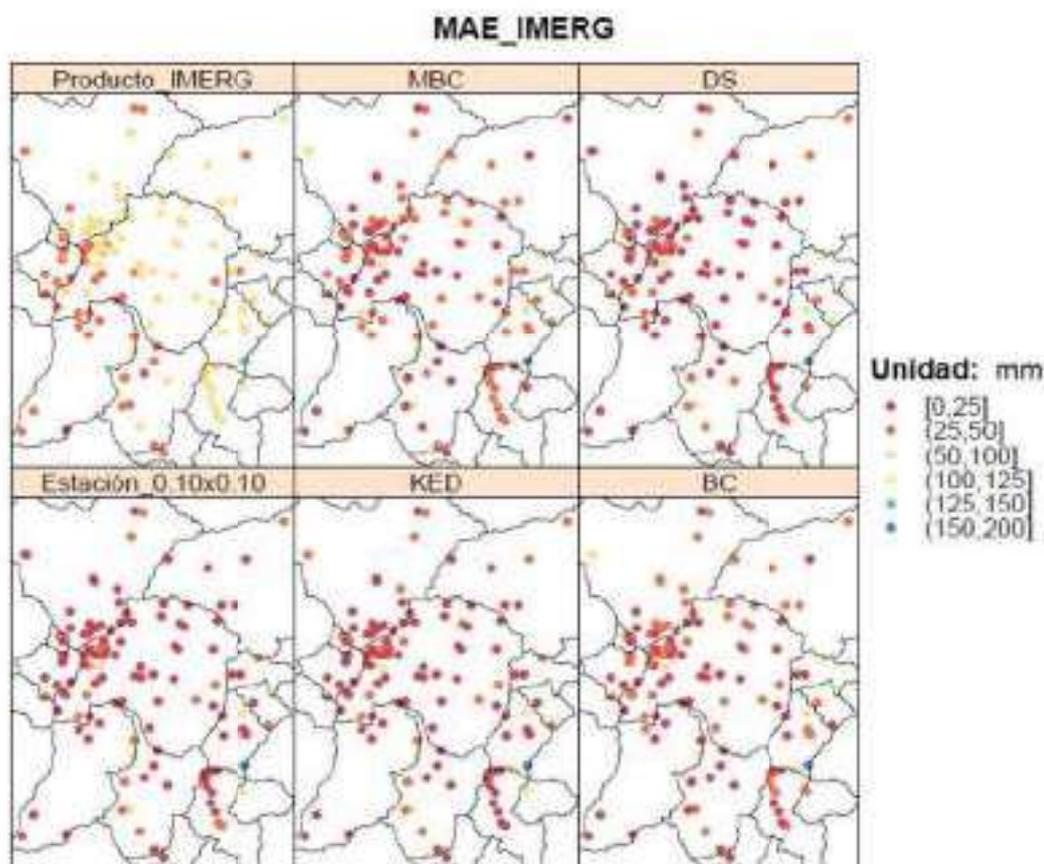
Para casi todas las estaciones el valor de RMSE esta entre 0 y 100 *mm*. Existe una mayor concentración de estaciones con *rmse* 0-25 en la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito. Sin embargo también es necesario tomar en cuenta que existe mucha variabilidad del error medio ME para estas mismas estaciones (Figura 4.100).



**FIGURA 4.100:** ME datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

A continuación se puede ver en la Figura 4.101 que los valores de MAE oscilan en su mayoría entre 0 y 100 *mm*, y que existen apenas unas 4 estaciones que sobrepasan este rango.



**FIGURA 4.101:** MAE datos observados y producto satelital IMERG v3 corregido - Resultado de Validación Cruzada

ELABORADO POR: Christian Díaz

Después de visualizar las figuras anteriores y la Tabla 4.28 se verifica que el método de corrección *DS* empleado con el producto satelital TMPA v7 presenta menores errores acompañados de una correlación aceptable ( $> 0.7$ ), por lo que se determina que supera a los demás métodos y se tomará como base para la generación de mapas de precipitación mensual multianual.

**TABLA 4.28:** Resultado de los índices calculados en la validación cruzada para el producto satelital TMPA v7

Índice	Producto TMPA	Estación 0.25x0.25	MBC	DS	KED	BC
ME	25.88	-0.34	-0.66	-0.28	4.93	-0.12
MAE	44.51	22.62	33.77	24.64	30.36	30.43
RMSE	50.83	27.41	39.54	30.91	36.18	36.14
r	0.67	0.87	0.73	0.83	0.80	0.79

ELABORADO POR: Christian Díaz

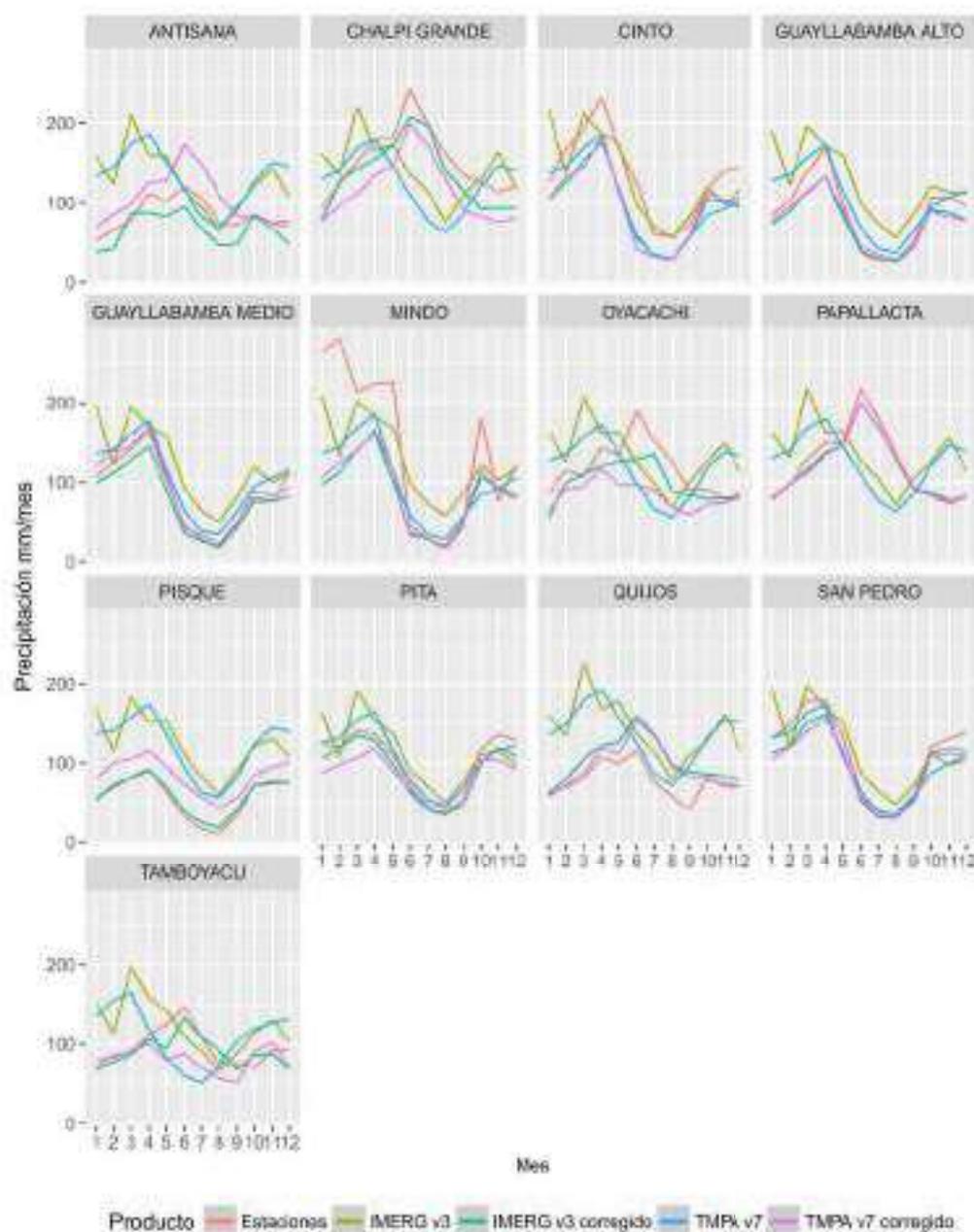
En la Tabla 4.29, se determina que el método *DS* produce los menores errores y la correlación más alta (0.88) con respecto a los datos observados y empleando el producto satelital IMERG v3.

**TABLA 4.29:** Resultado de los índices calculados en la validación cruzada para el producto satelital IMERG v3

Índice	Producto IMERG	Estación 0.10x0.10	MBC	DS	KED	BC
ME	41.76	-0.34	-0.65	-0.39	-0.27	6.05
MAE	55.46	22.62	32.98	24.07	24.32	30.84
RMSE	63.86	27.41	38.86	28.70	30.09	36.19
r	0.58	0.87	0.71	0.88	0.84	0.80

ELABORADO POR: Christian Díaz

Adicionalmente, en la Figura 4.102 se visualiza la precipitación de las observaciones de los pluviómetros, productos satelitales TMPA v7 e IMERG v3 y su respectiva corrección mediante DS. Se puede ver que mediante las técnicas de corrección se corrigió la precipitación a nivel cualitativo y cuantitativo, sobretodo, para las subcuencas de Chalpi Grande, Oyacachi, Papallacta y Tamboyacu, que poseen régimen unimodal y que no estaba siendo detectado por los productos satelitales.

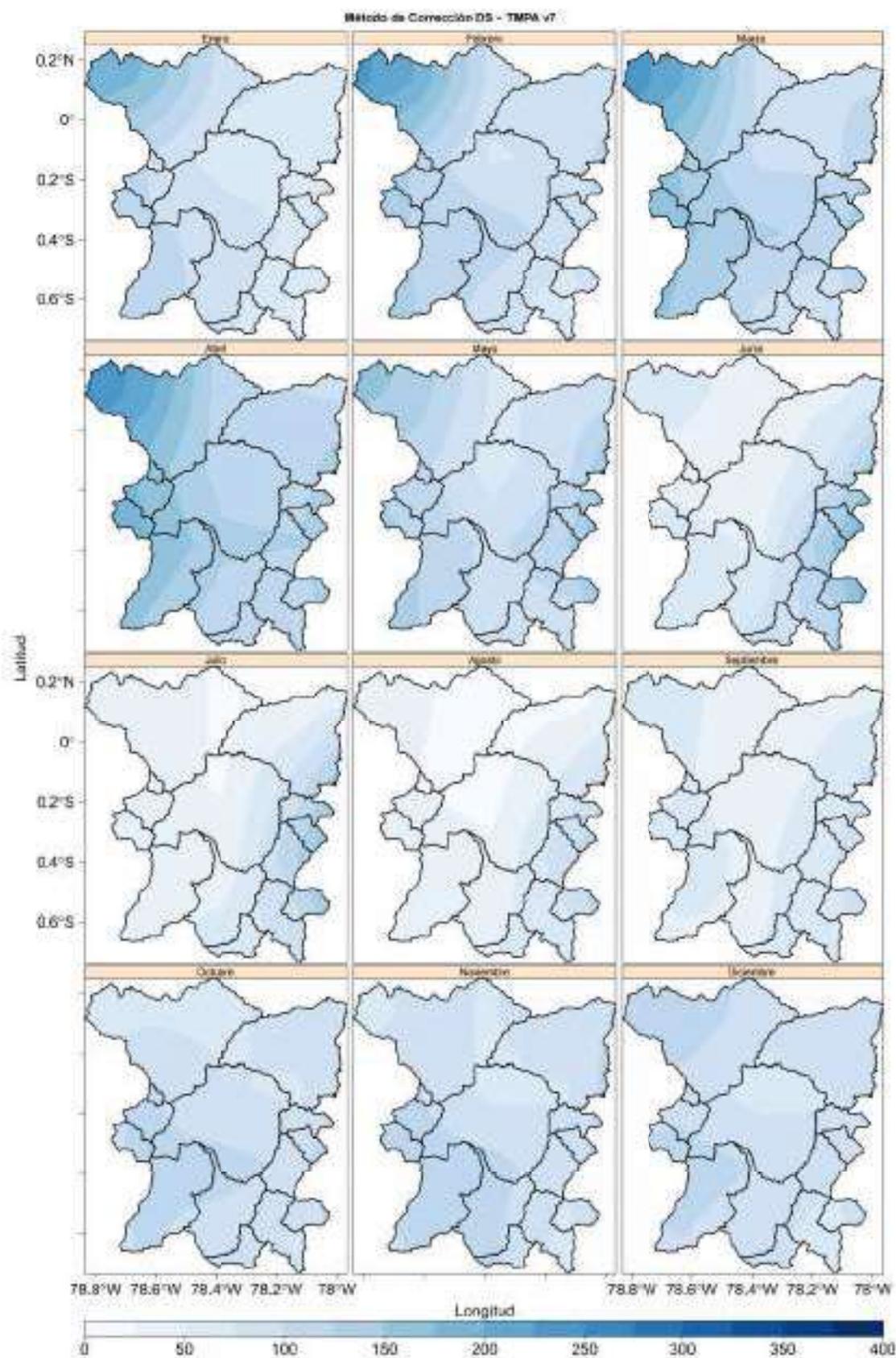


**FIGURA 4.102:** Precipitación media mensual multianual de productos satelitales corregidos con DS  
ELABORADO POR: Christian Díaz

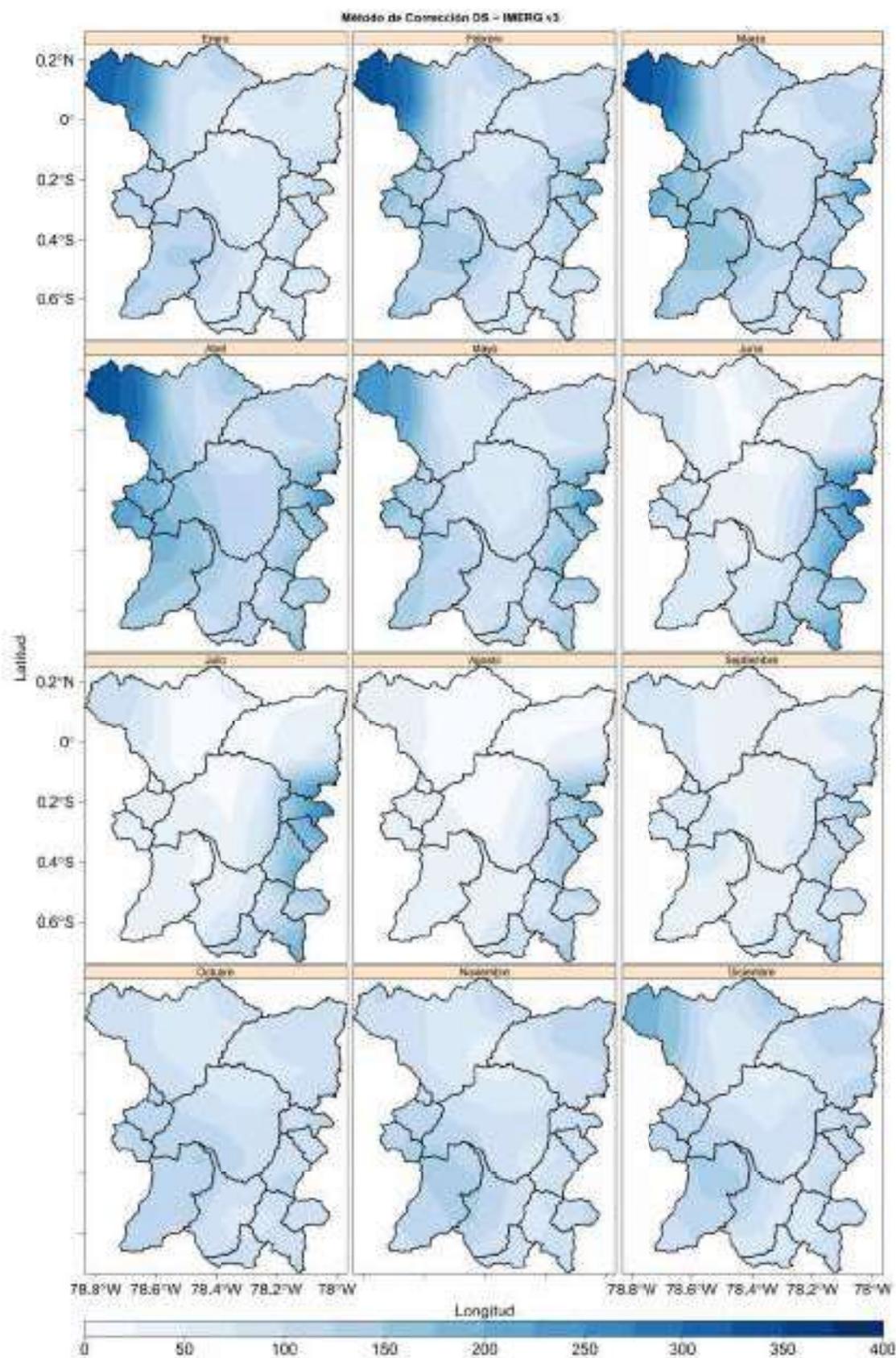
#### 4.3.3.4 Generación de mapas

Para la generación de mapas de precipitación se emplea el software RStudio, de modo que se obtienen mapas de precipitación mensuales multianuales para cada método de relleno (Regresión Lineal Simple, Regresión Lineal Múltiple, IDW, OK, Spline) y por cada método de corrección (BC, DS, KED, MBC). Anteriormente se determinó que DS supera a los demás métodos de corrección por lo que en esta sección se presentan algunos mapas considerando DS. Como por ejemplo la Figura 4.103, que corresponde a la precipitación satelital TMPA v7 corregida con el método DS que mostró los mejores resultados, ya que presentó los errores más pequeños y valores altos de correlación ( $r$  Pearson). En la Figura 4.103 se observa la precipitación media mensual multianual rellenada por Regresión Lineal Simple

para el producto TMPA v7 corregido con el método DS. En la Figura 4.104 se observa la precipitación media mensual multianual rellenada por Regresión Lineal Simple para el producto IMERG v3 corregido con el método DS. Los códigos o scripts para realizar los métodos de corrección se encuentran en el Anexo 6. Todos los mapas de isoyetas mensuales multianuales del producto TMPA v7 e IMERG v3 corregidos constan en el Anexo 11 y Anexo 12, respectivamente.



**FIGURA 4.103:** Mapa de precipitación satelital TMPA v7 corregida con el método de corrección DS  
ELABORADO POR: Christian Díaz



**FIGURA 4.104:** Mapa de precipitación satelital IMERG v3 corregida con el método de corrección DS  
ELABORADO POR: Christian Díaz

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Este estudio se centró en evaluar el producto IMERG v3 y TMPA v7 en la zona de influencia FONAG- EPMAPS, que comprende la parte alta de la cuenca del río Esmeraldas y Napo, además de analizar la influencia de los métodos de relleno. Se generó una base de datos de calidad controlada, siendo un aporte importante para aplicaciones posteriores. El análisis de estructura entre datos pluviométricos de una red de estaciones amplia y datos satelitales corresponde al período de 1998-2016 a escala mensual. Al evaluar los productos satelitales mediante las métricas estadísticas se llega a la conclusión de que estos productos logran captar la precipitación en forma cualitativa para la mayoría de subcuencas. También existe una sobreestimación de la precipitación a nivel cuantitativo que se corrige empleando la red pluviométrica, que consta de 131 estaciones hasta el momento.

- La precipitación está representada cualitativamente de manera correcta para las subcuencas con régimen de precipitación bimodal a diferencia de Chalpi Grande, Oyacachi, Papallacta, Tamboyacu, Antisana y Quijos, que tienen régimen bimodal y de transición. TMPA v7 presenta más errores que IMERG v3, debido a que tiene una menor resolución espacial que dificulta captar la variabilidad en algunas subcuencas.
- De los métodos de relleno temporales empleados se concluye que el método de regresión lineal simple arroja menores errores cuantitativos (PBias%, ME, RMSE) si se compara con los complementados con el método de regresión lineal simple con TMPA e IMERG y regresión lineal múltiple, que es el que le sigue en cuanto a errores menores. Al comparar con los métodos de relleno espaciales también existen errores significativos para las subcuencas de Chalpi Grande, Oyacachi, Papallacta y Tamboyacu. Ya que el método de regresión lineal simple tiene la correlación más alta (0.96) y produjo los errores más pequeños se empleó como base para la fusión con productos satelitales.
- Se establece que los métodos espaciales demuestran errores pequeños en comparación de los métodos temporales pero se requiere de una alta densidad de estaciones pluviométricas para su validación. Como en el caso de los valles donde existe una alta concentración de estaciones y un amplio período de información.
- Se encontró que la precipitación está representada en forma cualitativa por el producto satelital TMPA v7 e IMERG v3 en casi toda la zona de estudio. Cuantitativamente, los valores del producto TMPA v7 son menos acertados en la región andina. Se pudo observar que las métricas estadísticas tienen una tendencia constante en todo el estudio; en el producto satelital TMPA v7 se produjeron los errores más bajos para intensidades bajas (menor a 100 mm de precipitación). Los índices de detección mostraron la misma tendencia para las subcuencas en la zona de estudio, siendo más variable en el caso de los métodos espaciales.

- En general con TMPA se han obtenido errores cuantitativos y cualitativos menos elevados, debido al período de estudio que es más amplio (1998-2016) en comparación de IMERG que apenas se liberó en abril de 2014. Es decir, los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) y el índice de concordancia se acercan a valores cercanos a 1 para TMPA, pero los valores de IMERG igualmente son cercanos y se podrían mejorar a medida que el período de datos sea mayor o se opte por emplear menor resolución temporal (días, horas, minutos).
- A escala de subcuenca y para la zona de estudio el producto TMPA v7 se desempeña aceptablemente en subcuencas con régimen de precipitación bimodal, obteniendo errores cuantitativos ( $r$  Pearson y PBias %) similares para estudios con TMPA realizados en zona andina. Este producto tiene una tendencia a sobreestimar los valores de precipitación, sin embargo los resultados tanto a nivel de pluviómetro y región son cercanos en las estaciones ubicadas en el valle.
- De forma cualitativa, tanto TMPA como IMERG logran representar la precipitación observada por la mayoría de pluviómetros. Al realizar un análisis general de los índices de detección se determina que TMPA presenta mejores resultados. Además que los resultados de POD, FAR, FBI y ETS son aproximados a los teóricamente acertados para intensidades bajas (100 *mm*), lo que se confirma por las gráficas de dispersión. Esto se explica debido a los umbrales de precipitación establecidos, que están en función de los valores típicos del área. Los productos satelitales al sobreestimar la precipitación y estimar valores mayores a 200 *mm*, no están en concordancia con los datos observados lo que resulta en mayores errores para los índices de detección. De la misma manera se justifica en que el estudio se realizó a escala mensual, cuando los índices de detección han sido utilizados generalmente en escalas menores pero no existe limitación.
- La densidad de cobertura de la red de monitoreo pluviométrica es 100 *km*<sup>2</sup>/*estación*, lo que considera radios de influencia de 5 *km*. Esto cubre teóricamente y gráficamente más del 70 % la zona de estudio, comprendida por todas las subcuencas de aprovechamiento hídrico y subcuencas en la zona de influencia EPMAPS y FONAG. En el análisis de estructura espacial, mediante los correlogramas obtenidos se justifica con valores aceptables de correlación ( $r > 0.7$ ) en distancia menores a los 3 *km* como es el caso de la subcuenca de Mindo y Oyacachi (Figura 4.77). En general, se dice que las estaciones de la zona de estudio tendrían un radio de influencia de 3 *km*, pero estos valores aumentan si se consideran correlogramas de datos observados y productos satelitales a resoluciones espaciales de 0.10°x0.10° y 0.25°x0.25°. La subcuenca de Guayllabamba Alto presenta alta variabilidad por las condiciones climáticas muy localizadas (albedos, infraestructura, calentamiento diferencial) al igual que Guayllabamba Medio que tienen una alta concentración de estaciones pluviométricas de distintas instituciones.
- Se concluye que las zonas de precipitación que más difieren de los productos satelitales corresponde a las subcuencas de Antisana, Chalpi Grande, Oyacachi, Papallacta, Quijos y Tambojacu, debido al régimen de precipitación unimodal y de transición que no es detectado por los productos TMPA v7 e IMERG v3 sin corregir.
- Una vez realizada la corrección por los distintos métodos de corrección se determina

que DS (Double kernel-Smoothing) produce menores valores de PBias % alrededor del 7 % y errores ME, RMSE y MAE pequeños para cada método de relleno utilizado. Al realizar la corrección con DS se incrementan los valores del coeficiente de correlación sin importar el método de relleno, pero es más notorio con los métodos temporales. Al emplear la base rellena con regresión lineal simple para la fusión de productos satelitales se corrigieron las imágenes satelitales de TMPA v7 e IMERG v3 de manera que representen el régimen de precipitación adecuado para cada subcuenca (Figura 4.102).

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la optimización de estaciones pluviométricas e instalación de nuevas estaciones con el fin de incrementar la cobertura de manera coordinada. La instalación de nuevos pluviómetros urbanos (por parte de la EPMAPS, INAMHI, Secretaría del Ambiente u otra institución interesada), permitirá realizar estudios sobre la gestión de riesgos en la ciudad frente a eventos de lluvias intensas y estudios de la climatología urbana. La resolución de medida de los pluviómetros deberá ser el más adecuado para registrar las altas intensidades de lluvias que se han presentado históricamente en la ciudad y permitan validarlos con ayuda de los productos satelitales y sus últimas versiones.
- En vista que las características de IMERG mejoran en fechas posteriores se recomendaría emplear la última versión del producto para continuar explorando el potencial, así como también comparar e incrementar el período de estudio desde 1998 hasta 2018 para TMPA. Es altamente recomendable el empleo de productos satelitales a menores escalas de tiempo (min, hora, día) y complemento con métodos de relleno temporales, que son los que mejor captan la variabilidad de la precipitación; con el fin de utilizarlos como apoyo en los modelos de predicción para la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito, en la zona sur-este de la ciudad, donde se han identificado procesos convectivos importantes o en el seguimiento de procesos de formación de precipitaciones subitas que afectan a la ciudad de Quito.
- Se recomienda emplear la metodología del presente proyecto de titulación para estudios posteriores, pues se demostró que la base generada permite complementarse con los productos satelitales para una interpretación adecuada de los resultados. Además, aunque en este trabajo se utilizaron 131 estaciones de distintas instituciones, estudios posteriores pueden abarcar el uso de más estaciones, estaciones de una sola institución o incluso se pueden realizar análisis espaciales para evaluación del satélite en sus versiones más recientes, pues se concluye que el uso de la red de estaciones mejora la corrección de los productos en la zona de estudio.

Finalmente, TMPA presenta estimaciones muy aceptables, que mediante las técnicas de corrección, se representa y se corrige la precipitación de manera cualitativa como cuantitativamente. Ahora IMERG se convierte en una prometedora herramienta que continúa con el trabajo de TMPA. En la medida que más datos IMERG y nuevas versiones sean liberados, se hacen posibles más estudios del clima, que cada vez son más necesarios. Cabe mencionar, que a medida que IMERG mejore sus características permitirá explorar su potencial a futuro. Se espera que las estimaciones de precipitación en la región puedan dar a los usuarios de precipitación por satélite una mayor comprensión de las características de IMERG.

## REFERENCIAS

- [Abad Encalada, 2014] Abad Encalada, I. O. (2014). *Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográficas*. Proyecto Titulación Maestría- Universidad de Cuenca.
- [Almeida, 2010] Almeida, M. d. I. P. (2010). *Instructivos de procesamiento de información Hidrometeorológica*. Proyecto Titulación- EPN.
- [Ballari et al., 2016] Ballari, D., Castro, E., and Campozano, L. (2016). Validation of satellite precipitation (trmm 3b43) in ecuadorian coastal plains, andean highlands and amazonian rainforest. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- [Bedient et al., 2008] Bedient, Philip B. H. W. C. V. B. E. et al. (2008). *Hydrology and floodplain analysis*. Number Ed. 4. Prentice-Hall Inc.
- [Bedient et al., 2002] Bedient, P., Huber, W., and Vieux, B. (2002). *Hydrology and Floodplain Analysis*, volume 51. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [Brady et al., 2002] Brady, Nyle C. W. R. R. et al. (2002). *The nature and properties of soils*. Number Ed. 13. Prentice-Hall Inc.
- [Buytaert et al., 2003] Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B. d., Deckers, J., and Wyseure, G. (2003). Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo em el Sur Del Ecuador con TOPMODEL. *Revista Marginalia*, 6:149-157.
- [Buytaert et al., 2006] Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B., and Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south ecuadorian andes. *Journal of hydrology*, 329(3):413-421.
- [Cabrera Atiencia, 2016] Cabrera Atiencia, E. B. (2016). *Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay*. Trabajo final de Titulación previo a la obtención de Título de Ingeniero Civil - Universidad de Cuenca.
- [Campozano et al., 2016] Campozano, L., Célleri, R., Trachte, K., Bendix, J., and Samaniego, E. (2016). Rainfall and cloud dynamics in the andes: a southern ecuador case study. *Advances in Meteorology*, 2016:1-15.
- [Campozano et al., 2015] Campozano, L., Sánchez, E., Aviles, A., and Samaniego, E. (2015). Evaluation of infilling methods for time series of daily precipitation and temperature: The case of the ecuadorian andes. *Maskana*, 5(1):99-115.
- [Castro et al., 2015] Castro, L. M., Miranda, M., and Fernández, B. (2015). Evaluation of trmm multi-satellite precipitation analysis (tmpa) in a mountainous region of the central andes range with a mediterranean climate. *Hydrology Research*, 46(1):89-105.

- [Chang et al., 2013] Chang, L. T.-C., Cheung, K. K., and McCaneney, J. (2013). Case study of trmm satellite rainfall estimation for landfalling tropical cyclones: Issues and challenges. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2(2):109–123.
- [Derin et al., 2016] Derin, Y., Anagnostou, E., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Buytaert, W., Chang, C.-H., Delrieu, G., Hong, Y., Hsu, Y. C., et al. (2016). Multiregional satellite precipitation products evaluation over complex terrain. *Journal of Hydrometeorology*, 17(6):1817–1836.
- [Dinku et al., 2010] Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., and Ceccato, P. (2010). Validation and intercomparison of satellite rainfall estimates over colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5):1004–1014.
- [Duan et al., 2015] Duan, Y., Wilson, A. M., and Barros, A. P. (2015). Scoping a field experiment: error diagnostics of trmm precipitation radar estimates in complex terrain as a basis for iphex2014. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3):1501–1520.
- [Erazo et al., 2018] Erazo, B., Bourrel, L., Frappart, F., Chimborazo, O., Labat, D., Dominguez-Granda, L., Matamoros, D., and Mejia, R. (2018). Validation of satellite estimates (tropical rainfall measuring mission, trmm) for rainfall variability over the pacific slope and coast of ecuador. *Water*, 10(2):213.
- [FAO, 2000] FAO (2000). Manual on integrated soil management and conservation practices. *FAO Land and Water Bulletin*, (8):214.
- [Feidas, 2010] Feidas, H. (2010). Validation of satellite rainfall products over greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1-2):193–216.
- [Guo et al., 2016] Guo, H., Chen, S., Bao, A., Behrangi, A., Hong, Y., Ndayisaba, F., Hu, J., and Stepanian, P. M. (2016). Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over china. *Atmospheric Research*, 176:121–133.
- [Horna Kuonqui, 2016] Horna Kuonqui, L. N. (2016). *Evaluación hidrometeorológica y de sedimentos en la cuenca del río coca en la zona de influencia del proyecto coca codo sinclair*. Proyecto Titulación- EPN.
- [Hou et al., 2014] Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., and Iguchi, T. (2014). The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5):701–722.
- [Huffman et al., 1997] Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B., and Schneider, U. (1997). The global precipitation climatology project (gpcp) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(1):5–20.
- [Huffman and Bolvin, 2013] Huffman, G. J. and Bolvin, D. T. (2013). Trmm and other data precipitation data set documentation. *NASA, Greenbelt, USA*, pages 1–40.
- [Huffman et al., 2015] Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., and Yoo, S.-H. (2015). Nasa global precipitation measurement (gpm) integrated multi-satellite retrievals for gpm (imerg). *Algorithm theoretical basis document, version*, 4:30.

- [Huffman et al., 2007] Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., and Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1):38–55.
- [INAMHI, 2010] INAMHI (2010). Anuario meteorológico.
- [Jardí, 1985] Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19(1):41–68.
- [Kennedy et al., 1982] Kennedy, J. B., Neville, A. M., and Pulido, M. M. A. C. (1982). *Estadística para ciencias e ingeniería*. Harper & Row Latinoamericana.
- [Laraque et al., 2009] Laraque, A., Bernal, C., Bourrel, L., Darrozes, J., Christophoul, F., Armijos, E., Fraizy, P., Pombosa, R., and Guyot, J.-L. (2009). Sediment budget of the Napo river, Amazon basin, Ecuador and Peru. *Hydrological Processes*, 23(25):3509–3524.
- [Li and Shao, 2010] Li, M. and Shao, Q. (2010). An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data. *Journal of Hydrology*, 385(1-4):51–64.
- [Manz et al., 2016] Manz, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Lavado, W., Willems, B., Robles, L. A., and Rodríguez-Sánchez, J.-P. (2016). High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the tropical andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3):1190–1207.
- [Manz et al., 2017] Manz, B., Páez-Bimos, S., Horna, N., Buytaert, W., Ochoa-Tocachi, B., Lavado-Casimiro, W., and Willems, B. (2017). Comparative ground validation of imerg and tmpa at variable spatiotemporal scales in the tropical andes. *Journal of Hydrometeorology*, 18(9):2469–2489.
- [Mendoza et al., 2002] Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E., and Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, (49):92–117.
- [Monsalve, 1995] Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Departamento de Publicaciones, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia.
- [Nerini et al., 2015] Nerini, D., Zulkafli, Z., Wang, L.-P., Onof, C., Buytaert, W., Lavado-Casimiro, W., and Guyot, J.-L. (2015). A comparative analysis of trmm-rain gauge data merging techniques at the daily time scale for distributed rainfall-runoff modeling applications. *Journal of Hydrometeorology*, 16(5):2153–2168.
- [NO168, 2008] NO168, W. (2008). Guide to hydrological practices. *Data Acquisition and Processing*.
- [Ochoa et al., 2014] Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., and Willems, P. (2014). Evaluation of trmm 3b42 precipitation estimates and wrf retrospective precipitation simulation over the pacific-andean region of ecuador and peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8):3179–3193.

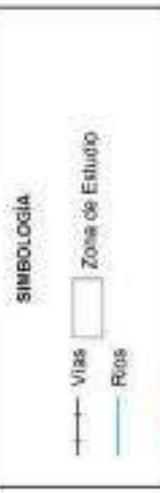
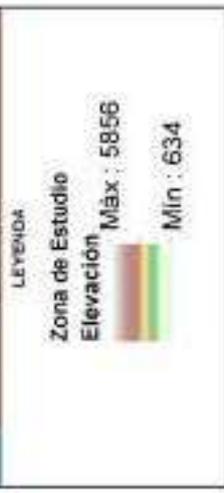
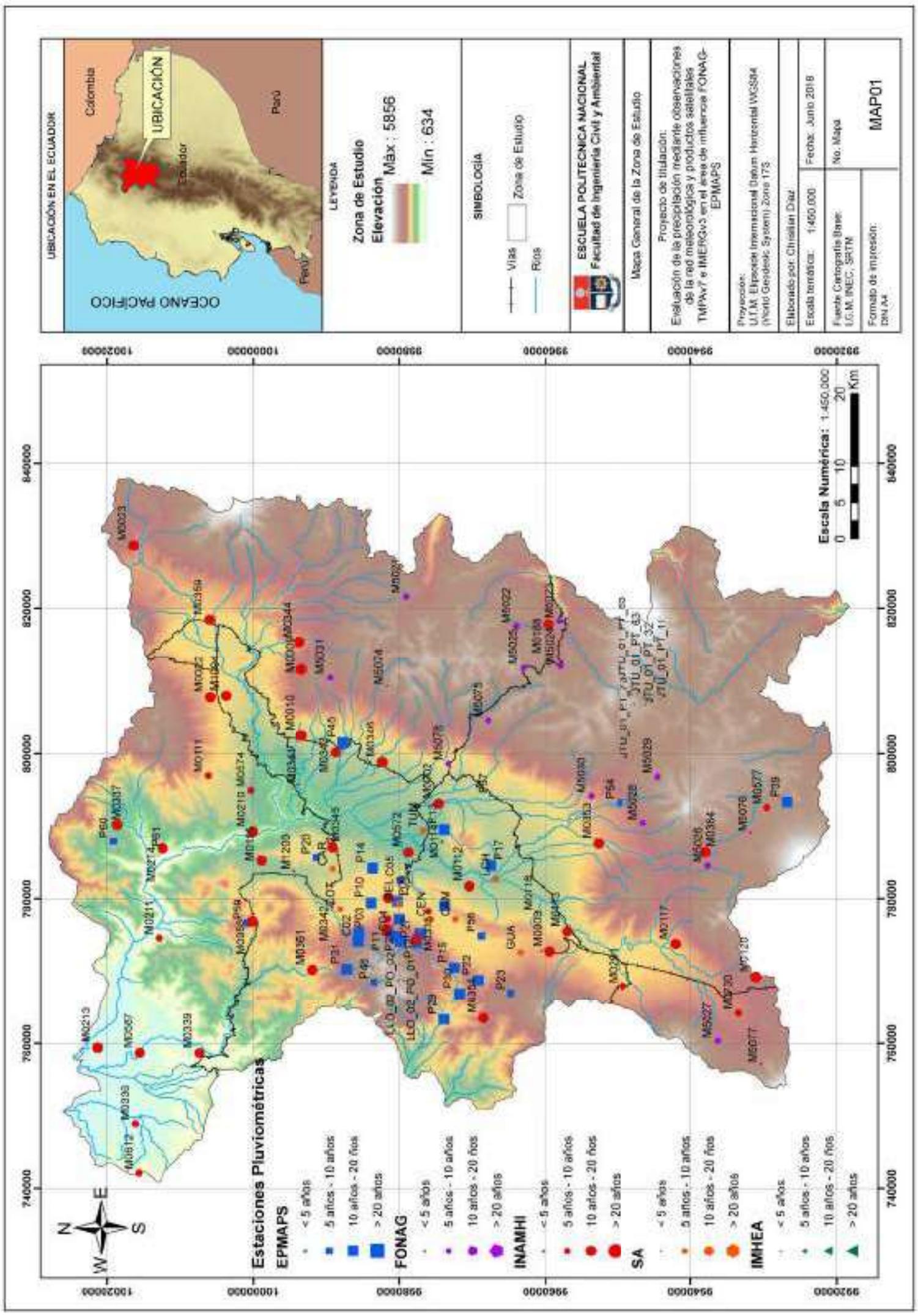
- [Ochoa, 2011] Ochoa, T. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Ecoe ediciones.
- [Organización Meteorológica Mundial, 2009] Organización Meteorológica Mundial (2009). *Guía de prácticas hidrológicas: Hidrología- de la medición a la información hidrológica*. Vol. 1(OMM N °168).
- [Padrón et al., 2015] Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., and Céleri, R. (2015). Rainfall in the andean páramo: new insights from high-resolution monitoring in southern ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3):985–996.
- [Pourrut et al., 1995] Pourrut, P. et al. (1995). *El agua en el Ecuador*. Quito-Ecuador: ORSTOM.
- [Prakash et al., 2016] Prakash, S., Mitra, A. K., Pai, D., and AghaKouchak, A. (2016). From trmm to gpm: How well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in Water Resources*, 88:1–7.
- [Romero et al., 2015] Romero, B. C., Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., González, F. M. C., and López, J. T. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río cuale, jalisco, méxico. *Investigación y Ciencia*, 23(64):26–34.
- [Satgé et al., 2016] Satgé, F., Bonnet, M.-P., Gosset, M., Molina, J., Lima, W. H. Y., Zolá, R. P., Timouk, F., and Garnier, J. (2016). Assessment of satellite rainfall products over the andean plateau. *Atmospheric Research*, 167:1–14.
- [Scheel et al., 2011] Scheel, M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., and Huffman, G. (2011). Evaluation of trmm multi-satellite precipitation analysis (tmpa) performance in the central andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8):2649–2663.
- [Steinskog et al., 2007] Steinskog, D. J., Tjøstheim, D. B., and Kvamstø, N. G. (2007). A cautionary note on the use of the kolmogorov–smirnov test for normality. *Monthly Weather Review*, 135(3):1151–1157.
- [Tan et al., 2016] Tan, J., Petersen, W. A., and Tokay, A. (2016). A novel approach to identify sources of errors in imerg for gpm ground validation. *Journal of Hydrometeorology*, 17(9):2477–2491.
- [Tang et al., 2015] Tang, G., Zeng, Z., Long, D., Guo, X., Yong, B., Zhang, W., and Hong, Y. (2015). Statistical and Hydrological Comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a Mid-latitude Basin: Is Day-1 IMERG a Good Successor for TMPA 3B42V7? *Journal of Hydrometeorology*, (2015).
- [Tang et al., 2016] Tang, G., Zeng, Z., Long, D., Guo, X., Yong, B., Zhang, W., and Hong, Y. (2016). Statistical and hydrological comparisons between trmm and gpm level-3 products over a midlatitude basin: Is day-1 imerg a good successor for tmpa 3b42v7? *Journal of Hydrometeorology*, 17(1):121–137.
- [Wan et al., 2010] Wan, Liying, Bertino, Laurent, and Zhu (2010). Assimilating altimetry data into a hycorn model of the pacific: ensemble optimal interpolation versus ensemble kalman filter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(1-4):51–64.

- [Wohl et al., 2012] Wohl, E., Barros, A., Brunsell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., Goldsmith, S., Harmon, R., Hendrickx, J. M., Juvik, J., et al. (2012). The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 2(9):655–662.
- [Yong et al., 2015] Yong, B., Liu, D., Gourley, J. J., Tian, Y., Huffman, G. J., Ren, L., and Hong, Y. (2015). Global view of real-time trmm multisatellite precipitation analysis: implications for its successor global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(2):283–296.
- [Zulkafli et al., 2014] Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., and Guyot, J.-L. (2014). A comparative performance analysis of trmm 3b42 (tropa) versions 6 and 7 for hydrological applications over andean–amazon river basins. *Journal of Hydrometeorology*, 15(2):581–592.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

### **Mapas de la Zona de Estudio**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
 Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Mapa General de la Zona de Estudio

Proyecto de titulación:  
 Evaluación de la precipitación mediante observaciones de la red meteorológica y productos satelitales TMPV7 e IMERGv3 en el área de influencia FONAG-EPMAPS

Proyección:  
 U.T.M. Elipsoida Internacional Datum Horizontal WGS84 (World Geodesic System) Zona 17S

Elaborado por: Christian Diaz	
Escala numérica: 1:450.000	Fecha: Junio 2018
Fuente Cartografía Base: I.C.M. INEC, SRTM	No. Mapa
Formato de impresión: DIN A4	<b>MAP01</b>



**Estaciones Pluviométricas EPMAPS**

- < 5 años
- 5 años - 10 años
- 10 años - 20 años
- > 20 años

**FONAG**

- < 5 años
- 5 años - 10 años
- 10 años - 20 años
- > 20 años

**INAMHI**

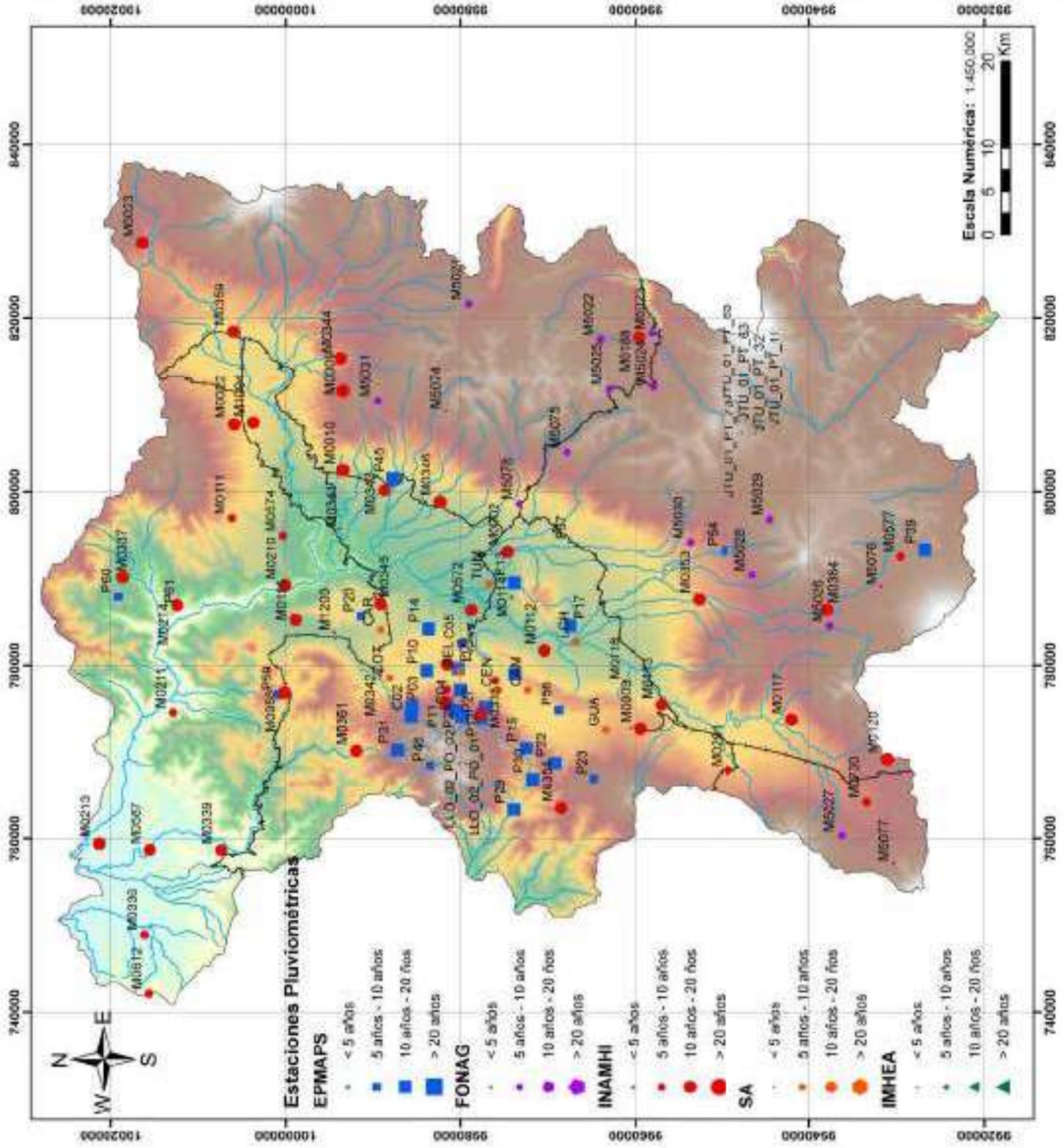
- < 5 años
- 5 años - 10 años
- 10 años - 20 años
- > 20 años

**SA**

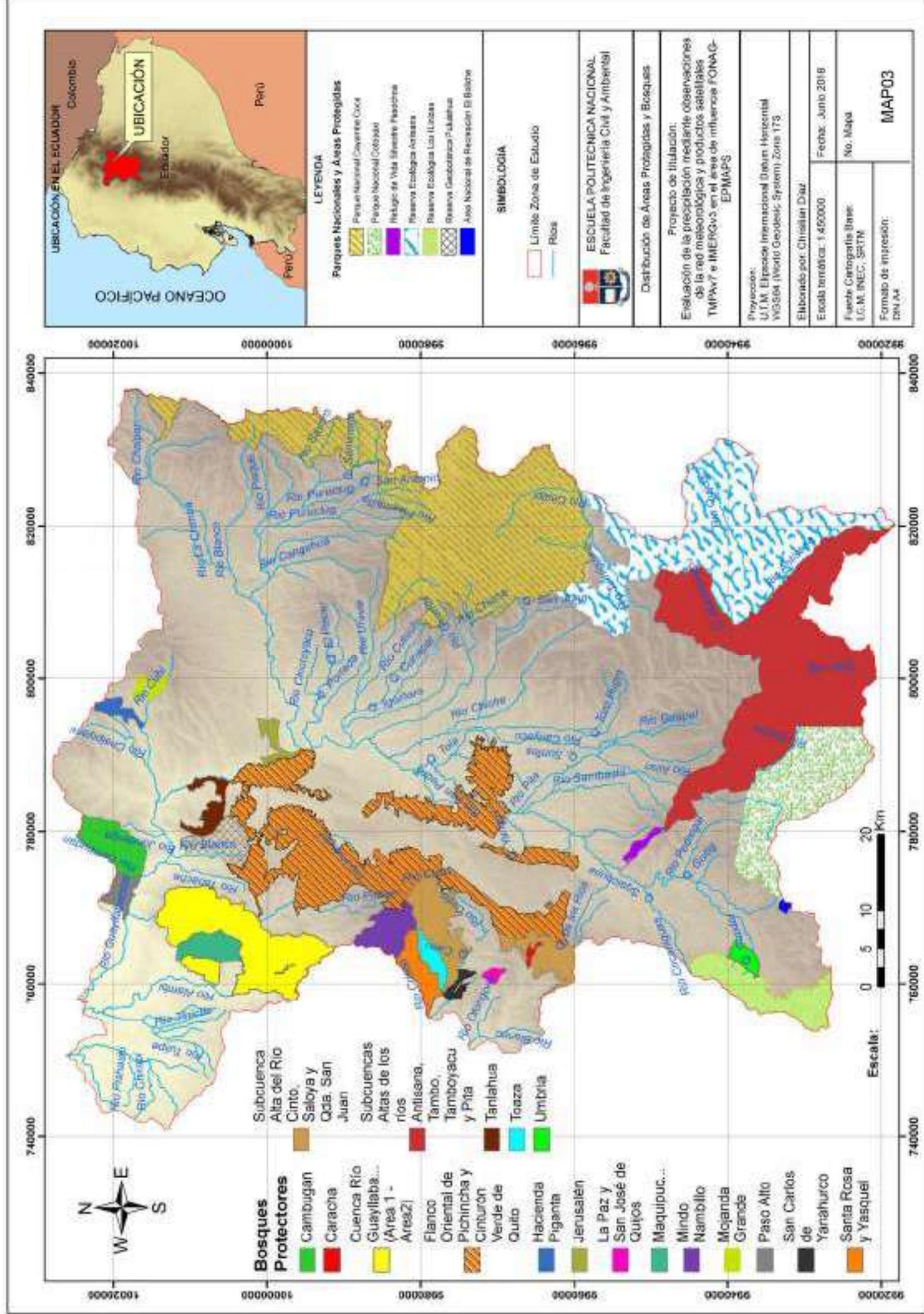
- < 5 años
- 5 años - 10 años
- 10 años - 20 años
- > 20 años

**IMHEA**

- < 5 años
- 5 años - 10 años
- 10 años - 20 años
- > 20 años









**LEYENDA**

Textura

FINA	GRUESA	MEDIA	MODERADAMENTE GRUESA	NIEVE	NO APLICABLE	ROCA	URBANO
------	--------	-------	----------------------	-------	--------------	------	--------

**SIMBOLOGIA**

	Limite Zona de Estudio
--	------------------------

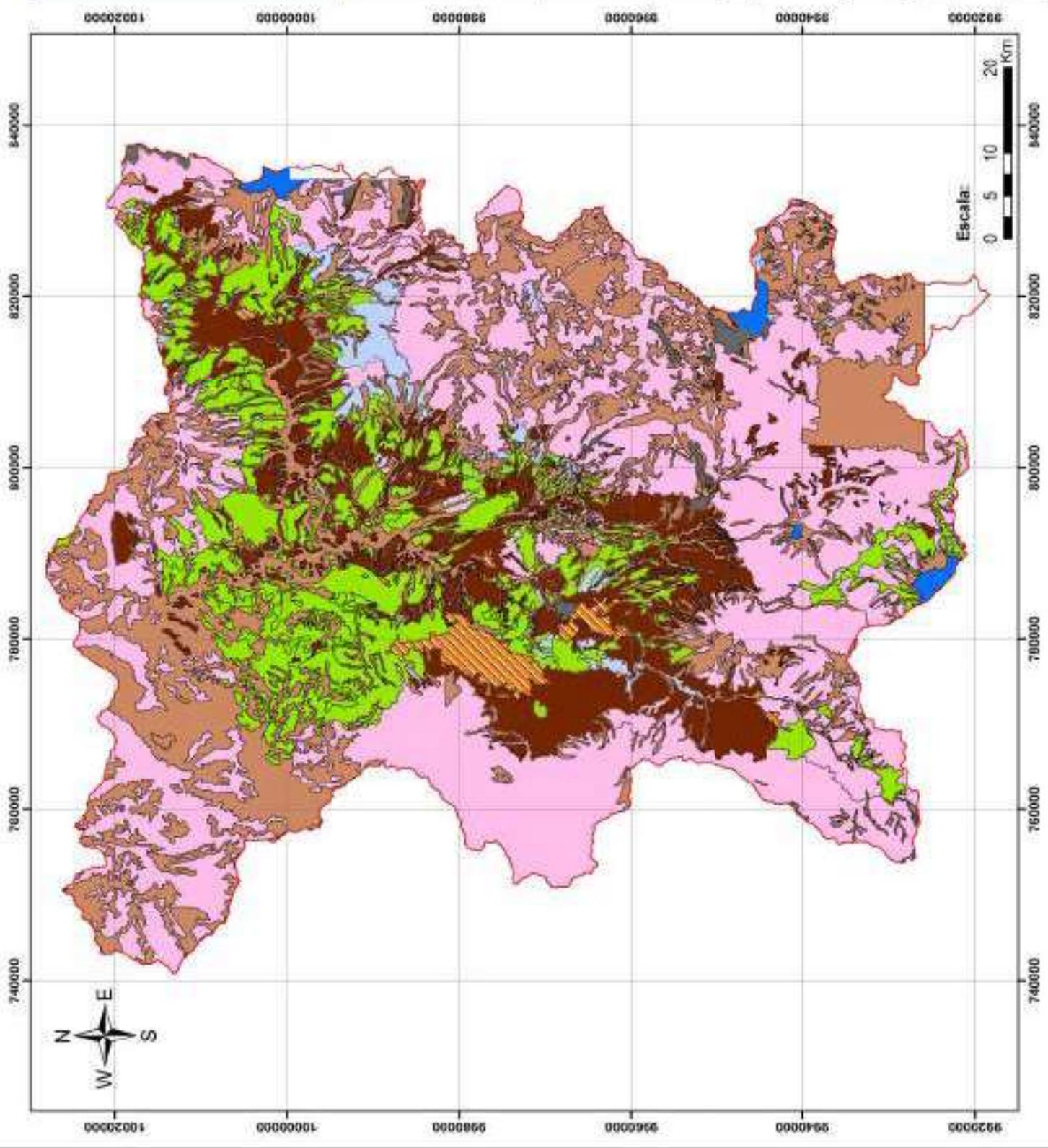
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

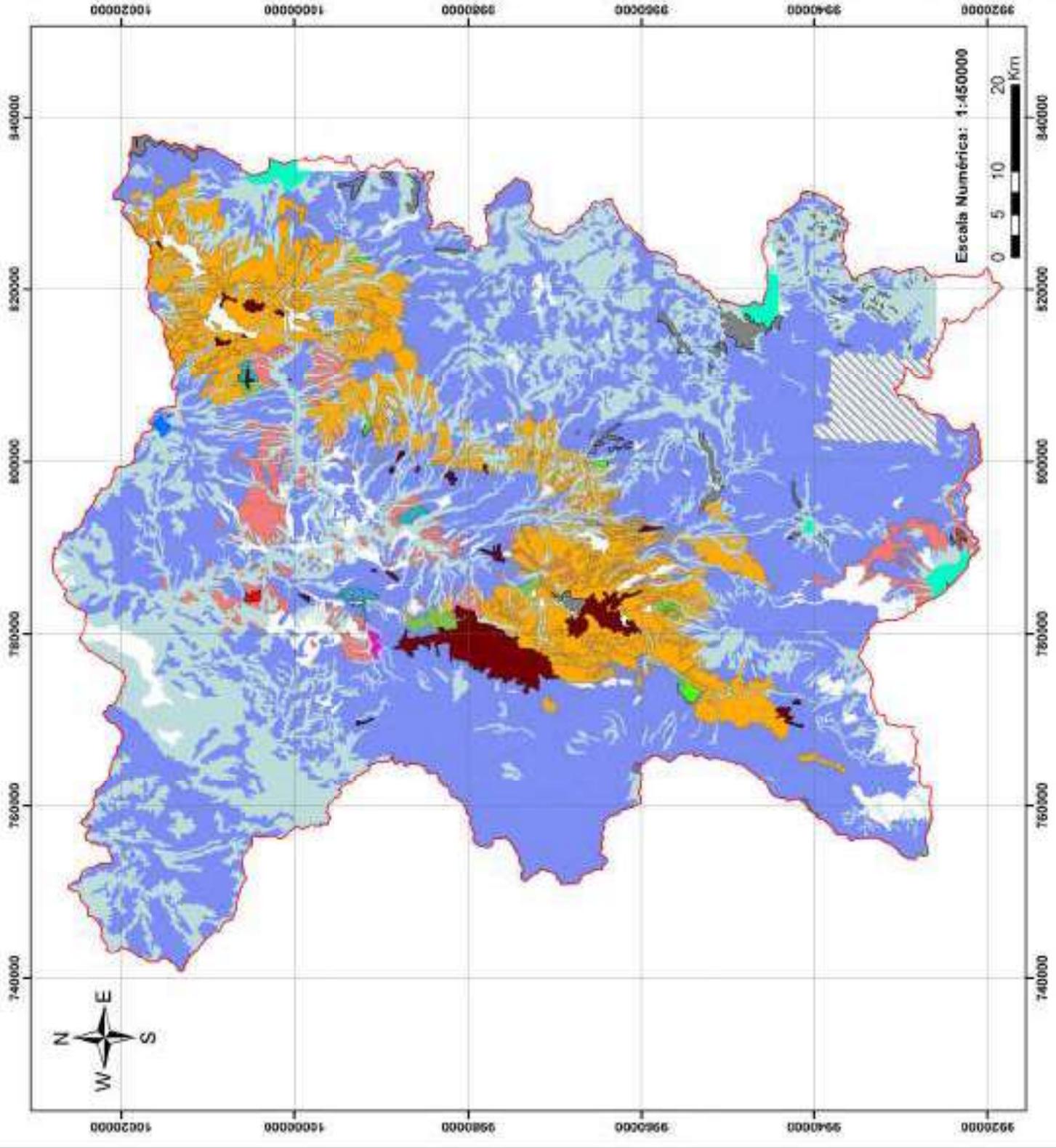
Textura del suelo en la Zona de Estudio

Proyecto de titulación:  
Evaluación de la precipitación mediante observaciones de la red meteorológica y productos satelitales TMPv7 e IMERGv3 en el área de influencia FONAG-EPMAFS

Proyección:  
U.T.M. Elipsoide Internacional Datum Horizontal WGS84 (World Geodesic System) Zona 173

Elaborado por: Christian Diaz	
Escala numérica: 1:450000	Fecha: Junio 2018
Fuente Cartografía Base: I.C.M. INEC, SRTM	No. Mapa
Formato de impresión: DIN A4	<b>MAP04</b>





**LEYENDA**

**Taxonomía**

Alfardes	Mollic
Cuerpo de Agua Natural	Mollic - Inceptisoles
Entisol	Nieve
Entisoles - Inceptisoles	Urbano
Entisoles - Mollics	Roca
Inceptisol	Sin Información
Inceptisoles - Entisoles	Sin Suelo
Inceptisoles - Mollics	

**SIMBOLOGÍA**

	Limite Zona de Estudio
--	------------------------

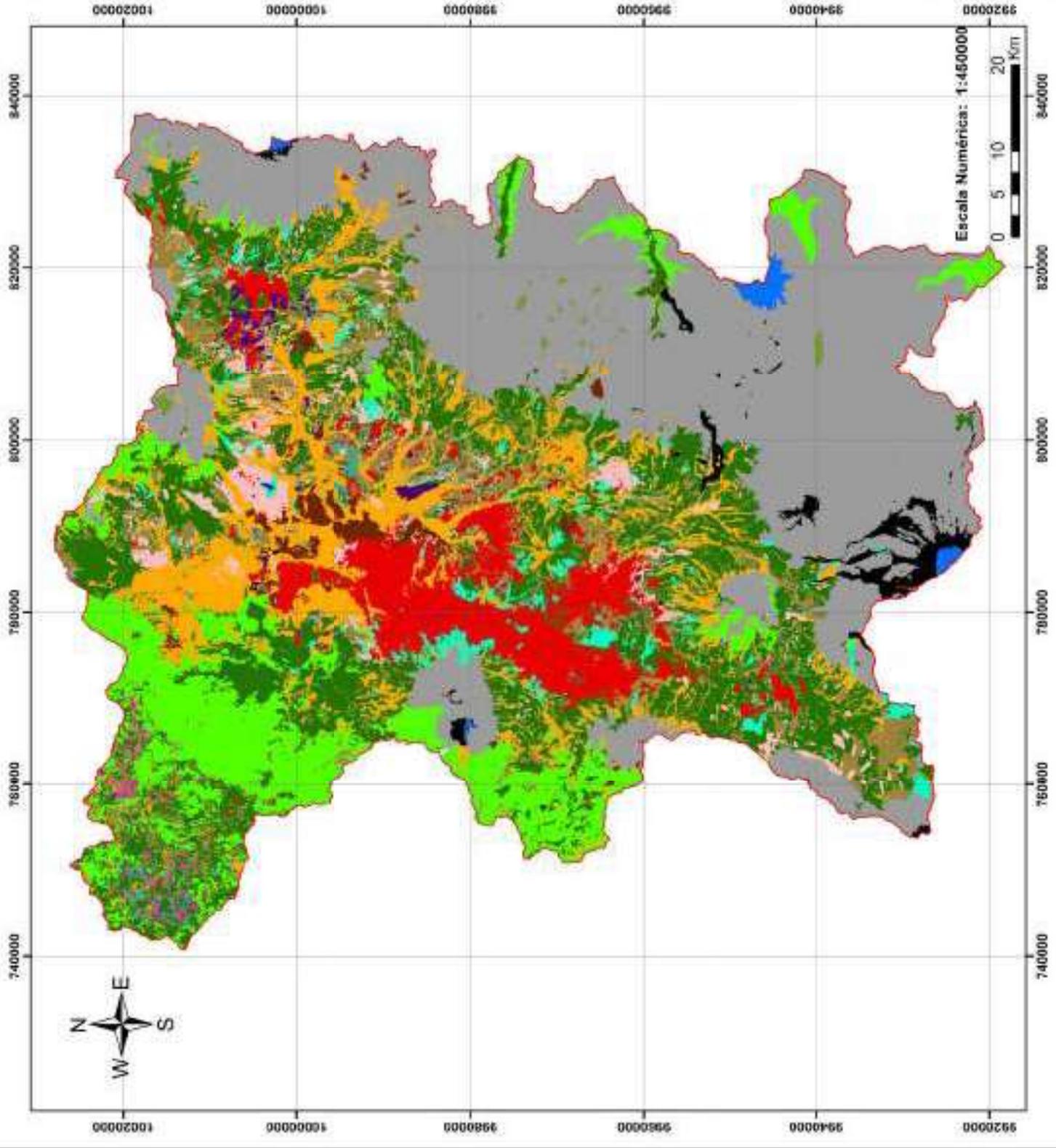
**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

**Taxonomía del suelo en la Zona de Estudio**

Proyecto de titulación:  
Evaluación de la precipitación mediante observaciones de la red meteorológica y productos satelitales TMPv7 e IMERGv3 en el área de influencia FONAG-EPMAFS

Proyección:  
U.T.M. Elipsoide Internacional Datum Horizontal WGS84 (World Geodesic System) Zona 17S

Elaborado por: Christian Diaz	
Escala numérica: 1:450000	Fecha: Junio 2018
Fuente Cartografía Base: I.C.M. INEC, SRTM	No. Mapa
Formato de impresión: DIN A4	<b>MAP05</b>



**LEYENDA**  
Cobertura del Suelo

Área urbana	Área de cobertura vegetal	Área de agricultura	Área de pastoreo	Área de cultivos						
[Red]	[Green]	[Yellow]	[Light Green]	[Light Blue]	[Light Purple]	[Light Cyan]	[Light Orange]	[Light Pink]	[Light Brown]	[Light Grey]
Área urbana	Área de cobertura vegetal	Área de agricultura	Área de pastoreo	Área de cultivos						

**SIMBOLOGÍA**

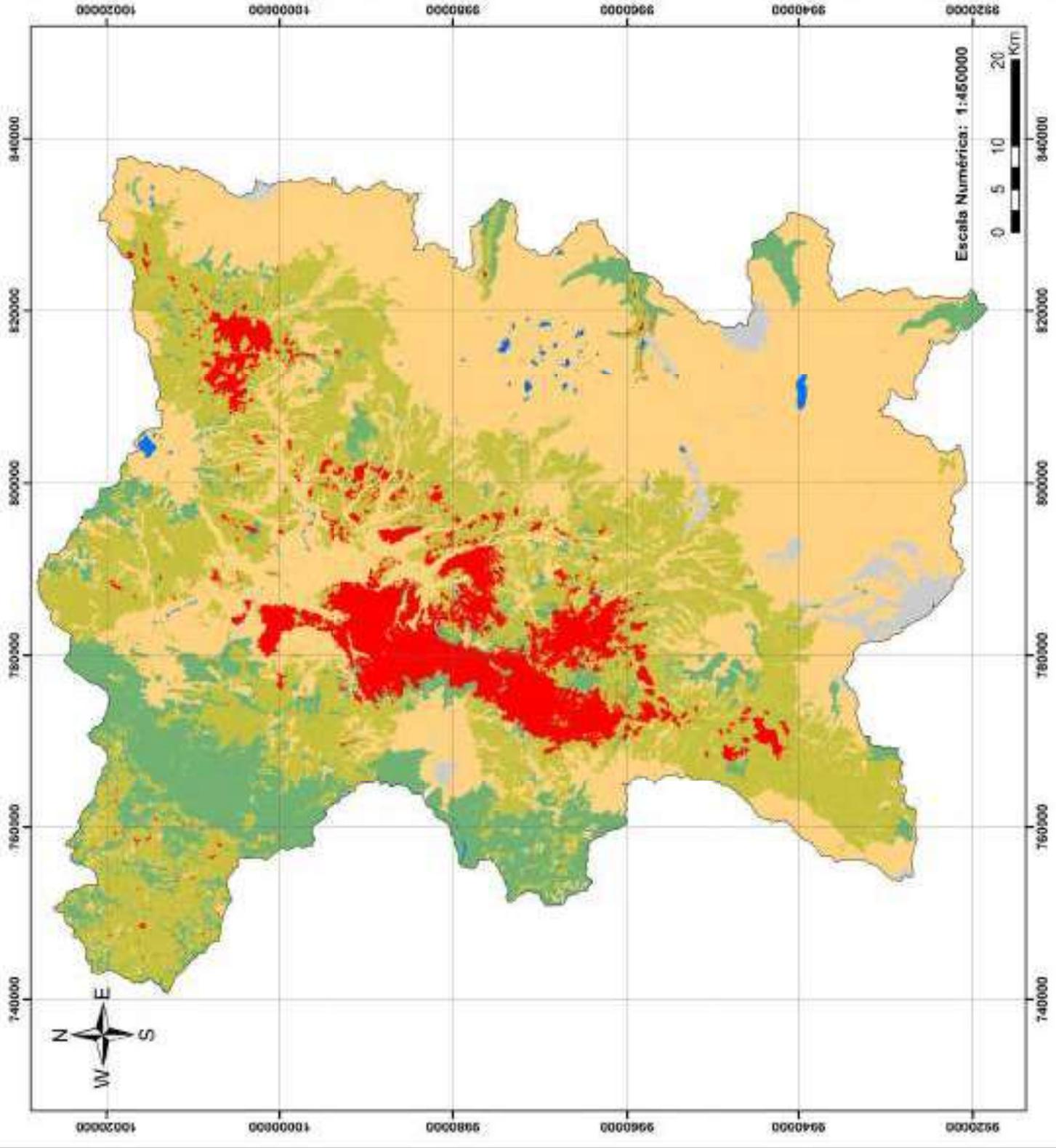
[Red Line]	Límite Zona de Estudio
------------	------------------------

**ESCUOLA POLITÉCNICA NACIONAL**  
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

**Cobertura Vegetal de la Zona de Estudio**  
Proyecto de titulación:  
Evaluación de la precipitación mediante observaciones de la red meteorológica y productos satelitales TMPV7 e IMERGv3 en el área de influencia FONAG-EPMAPS

Proyección:  
U.T.M. Elipsoide Internacional Datum Horizontal WGS84 (World Geodesic System) Zona 17S

Elaborado por: Christian Diaz	Fecha: Junio 2018
Escala temática: 1:450000	No. Mapa
Fuente Cartografía Base: I.C.M. INEC, SRTM	<b>MAP06</b>
Formato de impresión: DIN A4	



- LEYENDA**
- Uso del Suelo
- BOSQUE
  - CUERPO DE AGUA
  - OTRAS AREAS
  - TIERRA AGROPECUARIA
  - VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBACEA
  - ZONA ANTROPICA

**SIMBOLOGÍA**

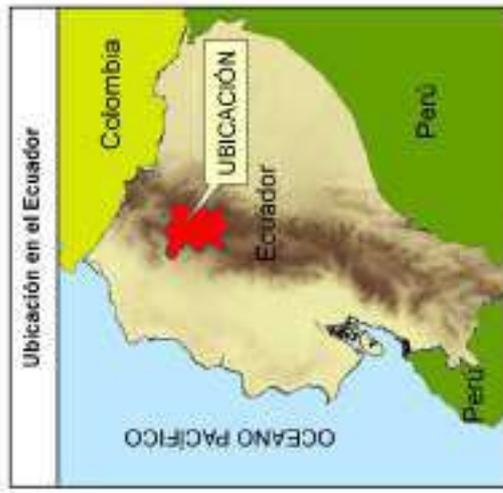
Límite Zona de Estudio



Uso del Suelo de la Zona de Estudio

Proyecto de titulación:  
Evaluación de la precipitación mediante observaciones de la red meteorológica y productos satelitales TMPv2 yIMERGv3 en el área de influencia FONAG-EPMAFS

Proyección: U.T.M. Elipsoide Internacional Datum Horizontal WGS84 (World Geodesic System) Zona 17S	
Elaborado por: Christian Diaz	Fecha: Junio 2018
Escala numérica: 1:450000	No. Mapa
Fuente Cartografía Base: I.C.M. INEC, SRTM	Formato de impresión: DIN A4
<b>MAP07</b>	

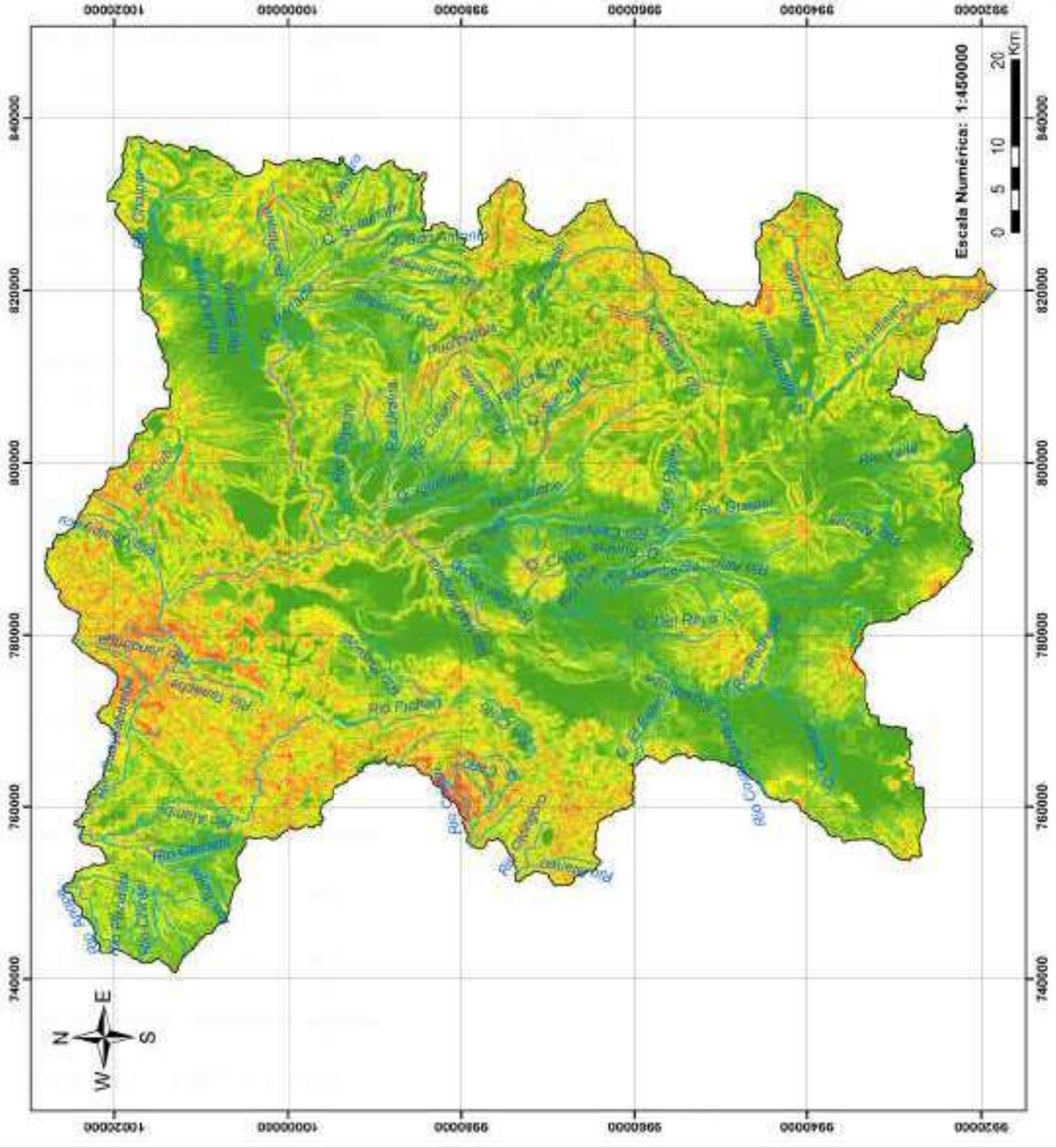


ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Pendientes en la Zona de Estudio

Proyecto de titulación:  
Evaluación de la precipitación mediante observaciones de la red meteorológica y productos satelitales TMPv2 y IMERGv3 en el área de influencia FONAG-EPMAPS

Proyección: U.T.M. Elipsoide Internacional Datum Horizontal WGS84 (World Geodesic System) Zona 17S	
Elaborado por: Christian Diaz	
Escala numérica: 1:450000	Fecha: Junio 2018
Fuente Cartografía Base: I.C.M. INEC, SRTM	No. Mapa
Formato de impresión: DIN A4	<b>MAP08</b>



**Ubicación en el Ecuador**

**LEYENDA**

<b>Pendiente</b>	Neve
Cobracho	No definido
Cubicos de agua	Plano e casi plano
Escarpado	En interacción
Moderadamente ondulado	Suave e ligeramente ondulado
Montañoso	Urbano

**SIMBOLOGIA**

Ríos
Límite Zona de Estudio

**ESCUOLA POLITÉCNICA NACIONAL**  
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Relieve en la Zona de Estudio

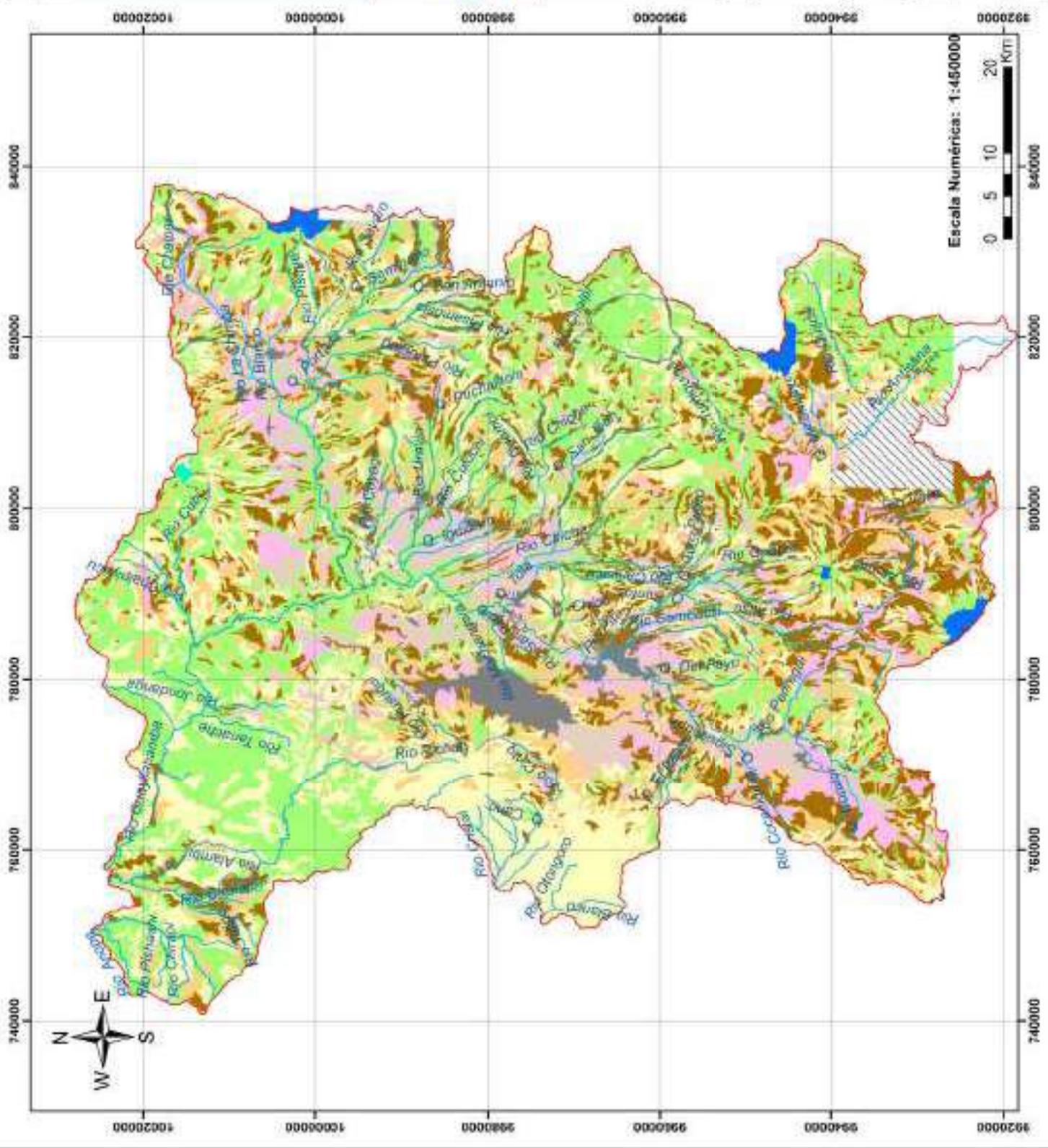
Proyecto de titulación:  
Evaluación de la precipitación mediante observaciones de la red meteorológica y productos satelitales TMPv7 e IMERGv3 en el área de influencia FONAG-EPMAPS

Proyección:  
U.T.M. Elipsoide Internacional Datum Horizontal WGS84 (World Geodesic System) Zona 17S

Elaborado por: Christian Diaz

Fecha: Junio 2018
No. Mapa
Fuente Cartografía Base: I.C.M. INEC, SRTM
Formato de impresión: DIN A4

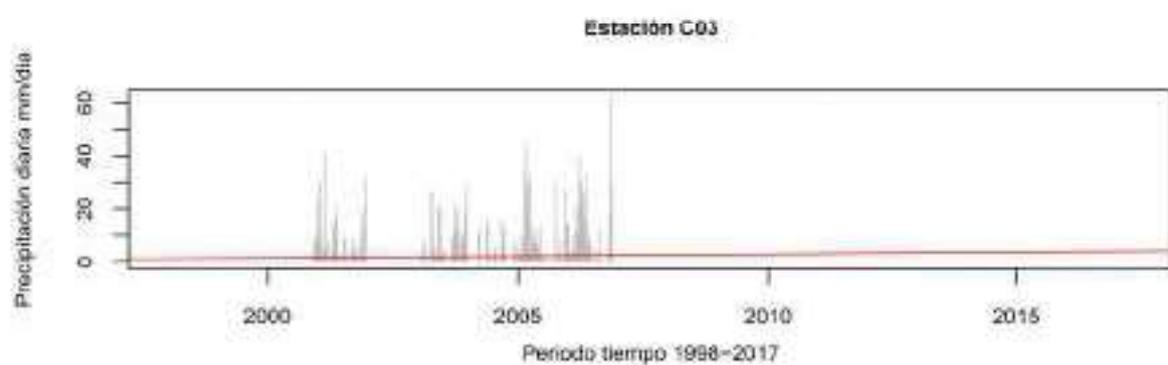
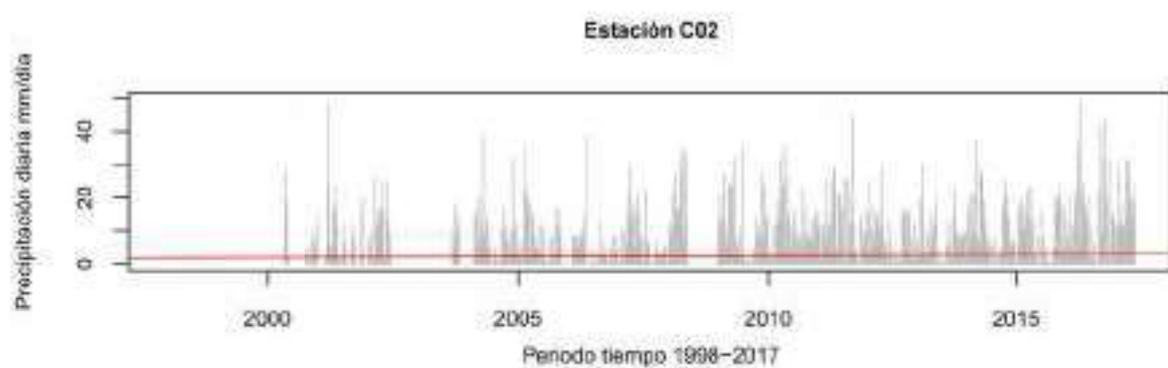
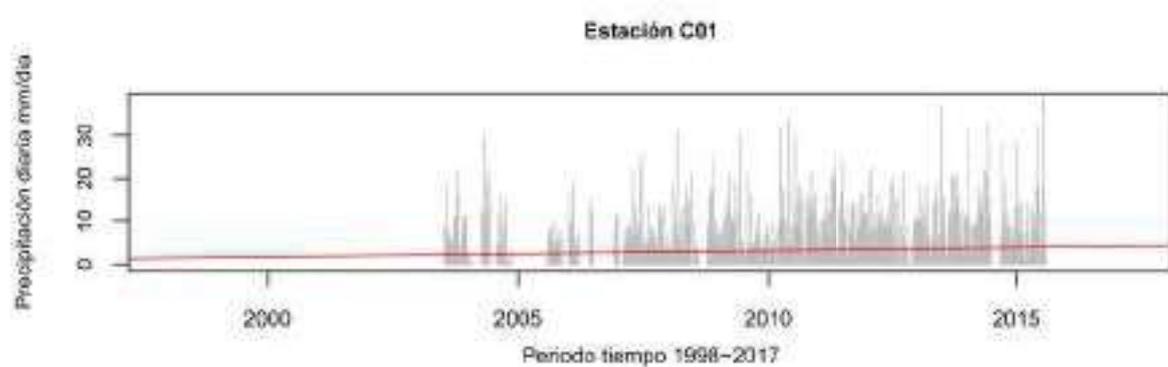
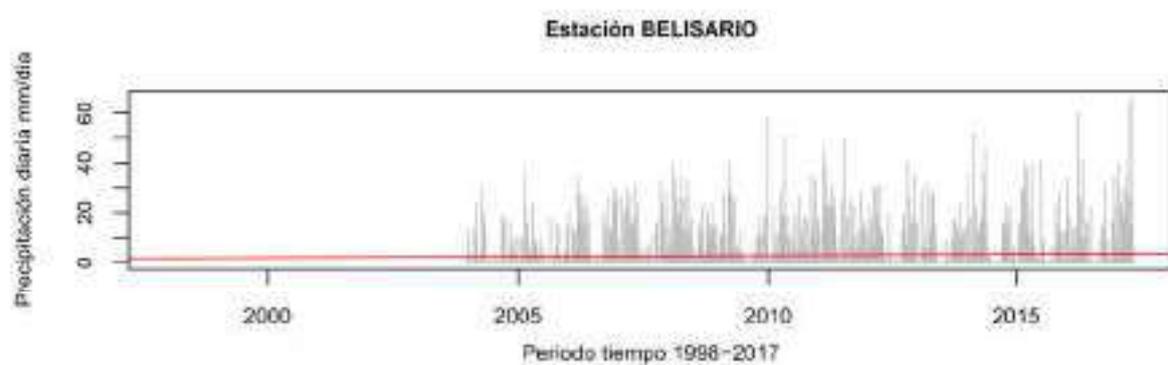
**MAP09**

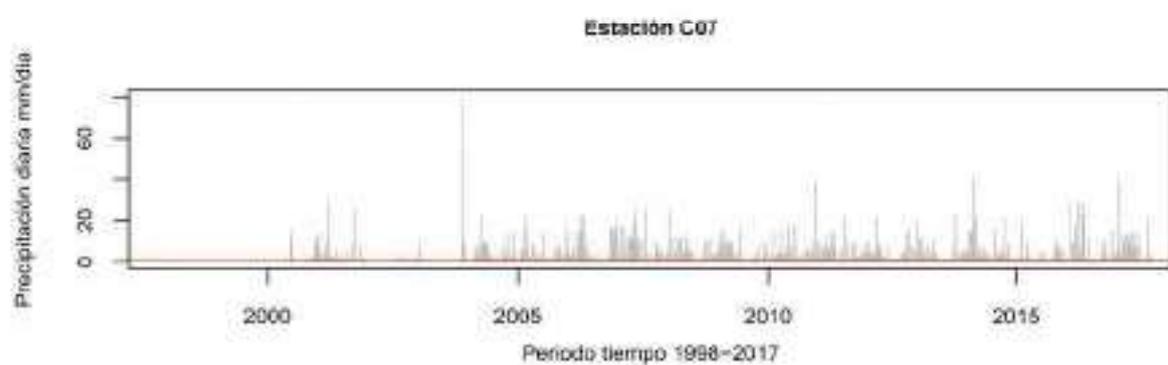
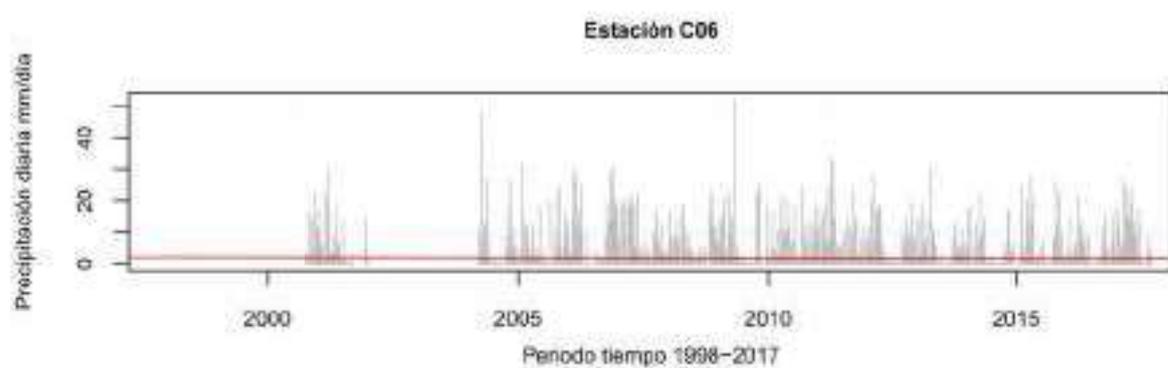
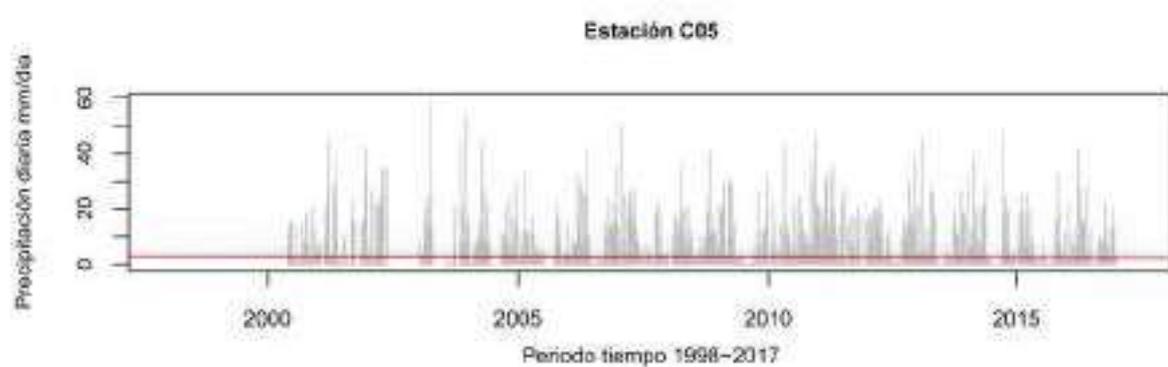
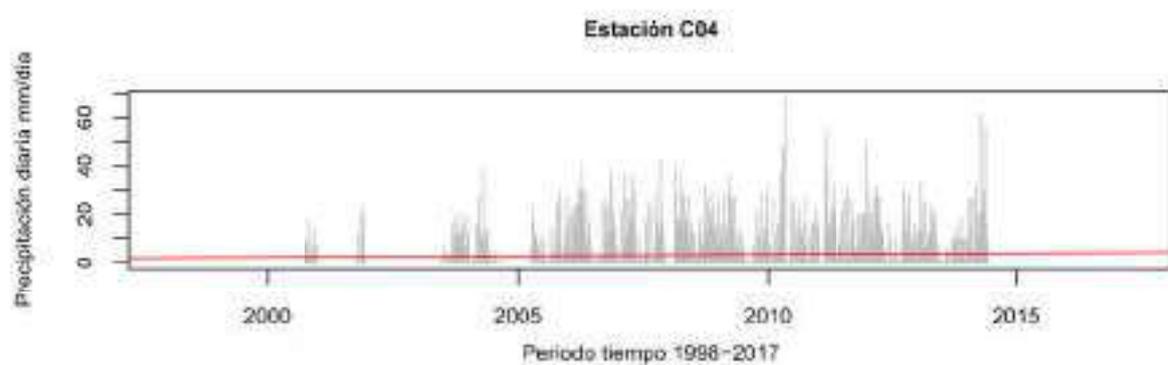


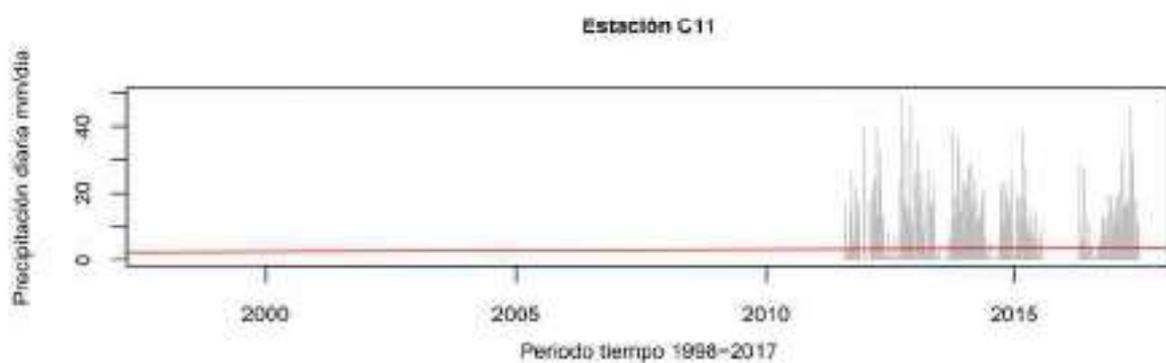
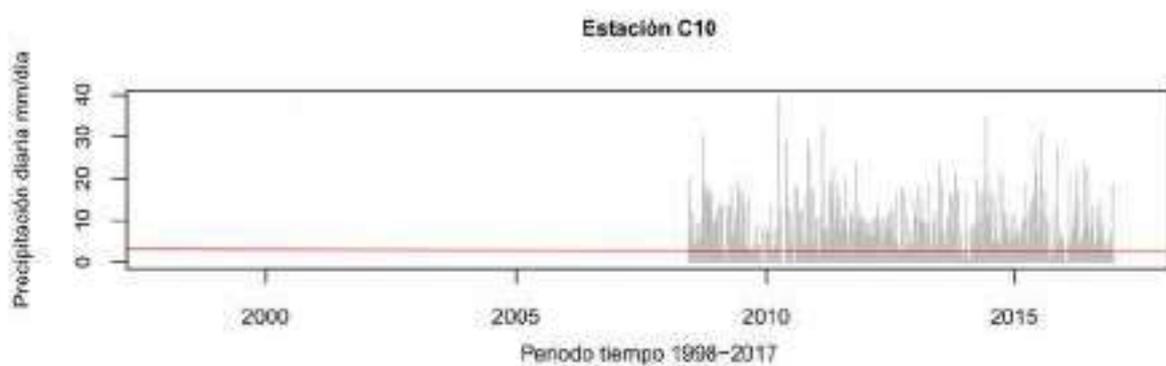
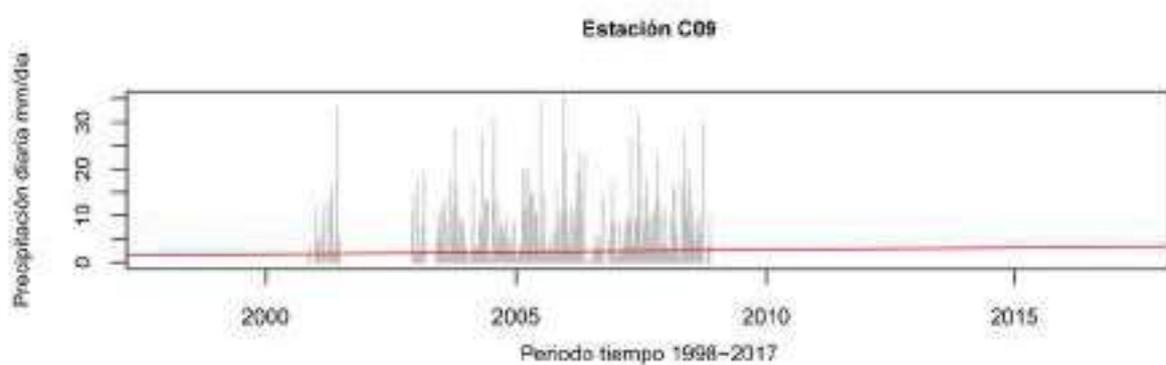
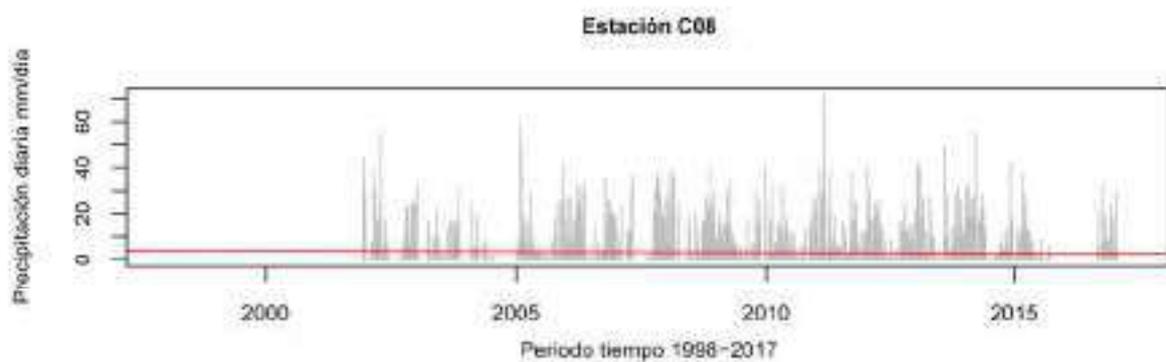


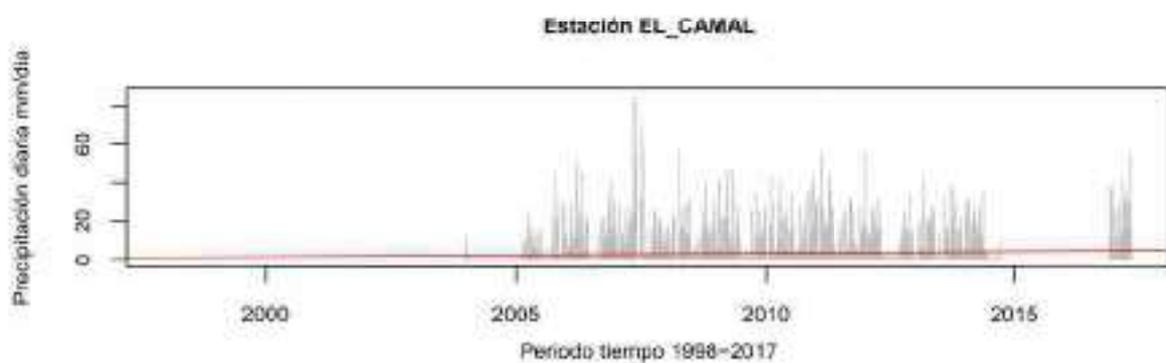
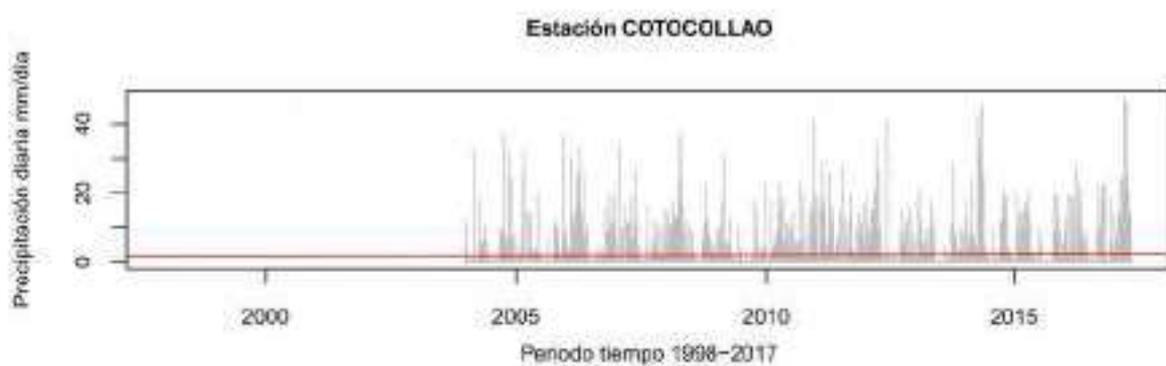
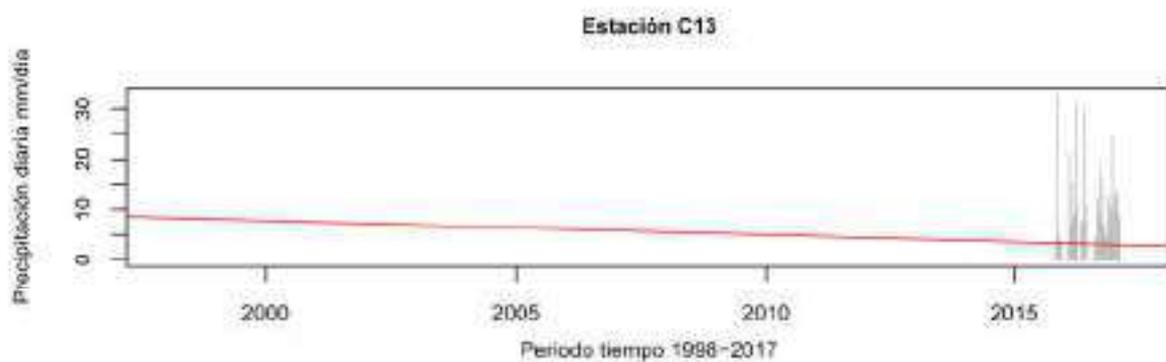
## **ANEXO 2**

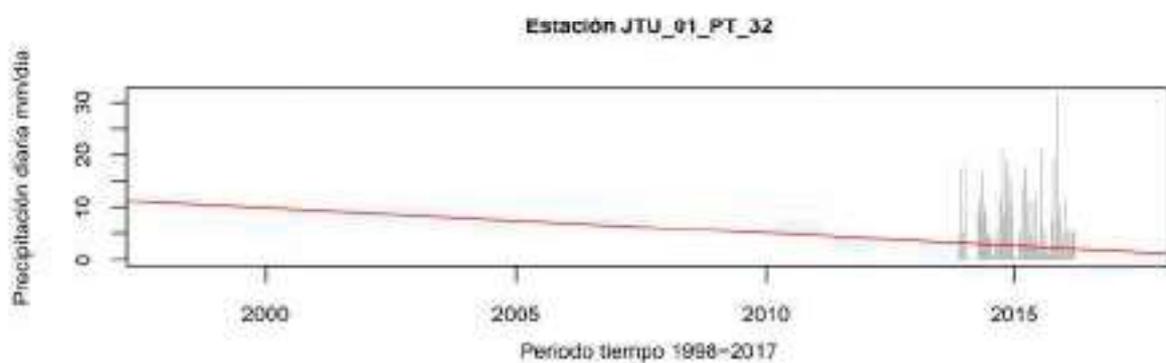
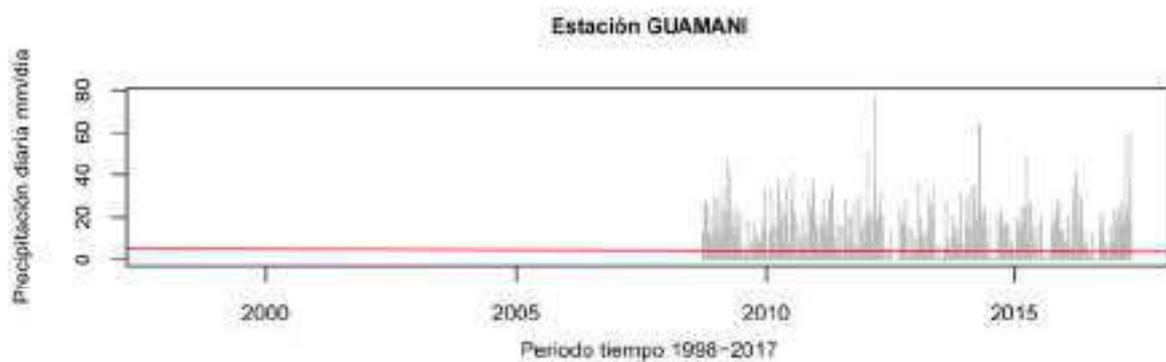
### **Precipitación media diaria**

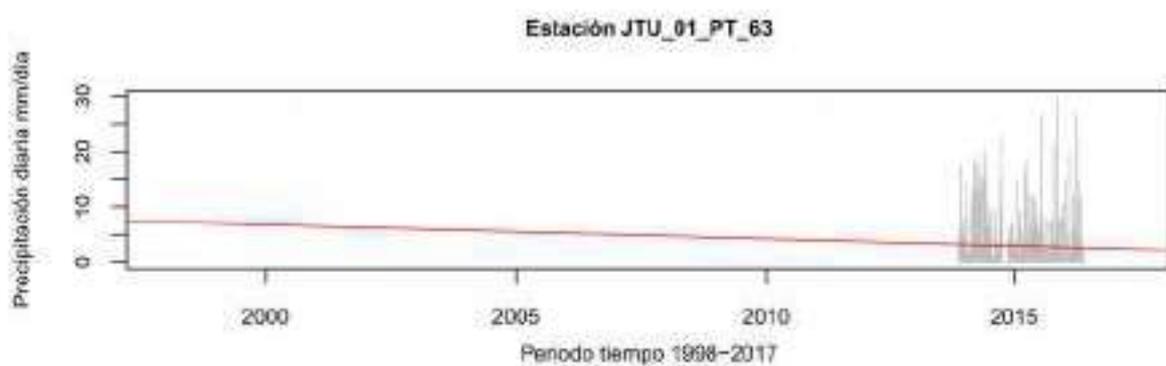
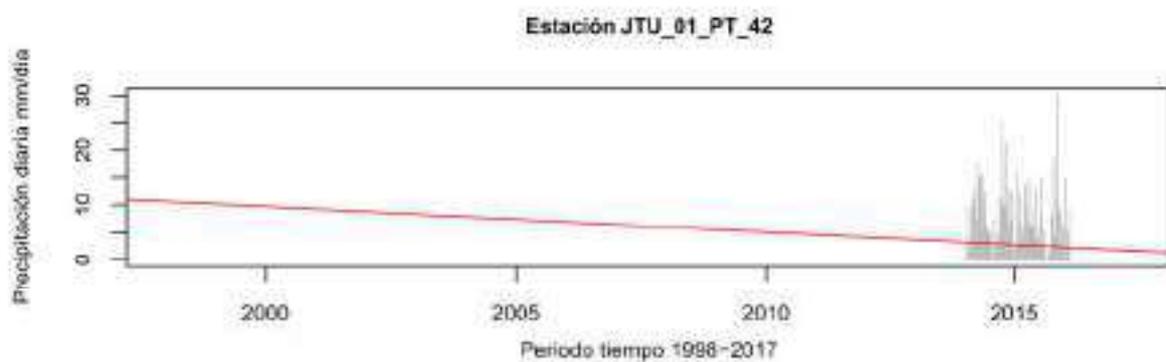


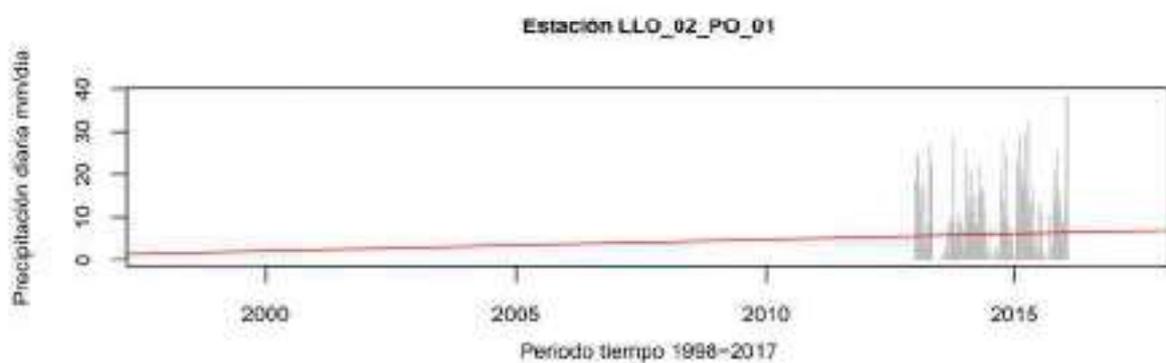
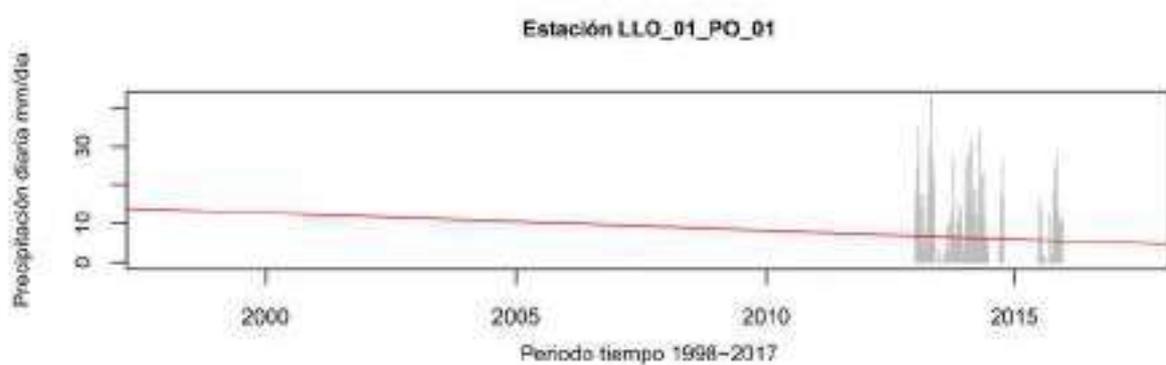
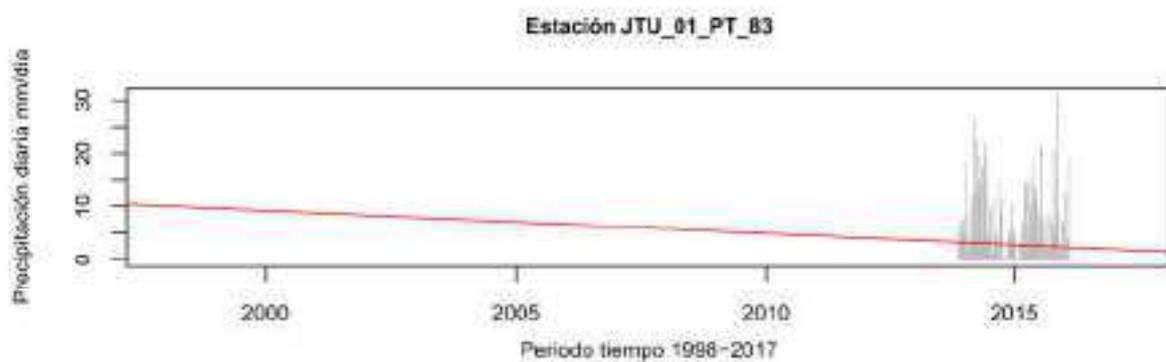


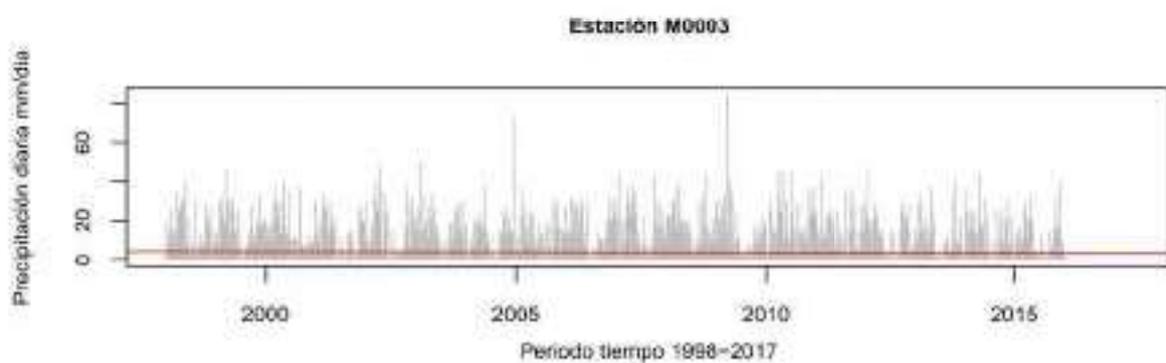
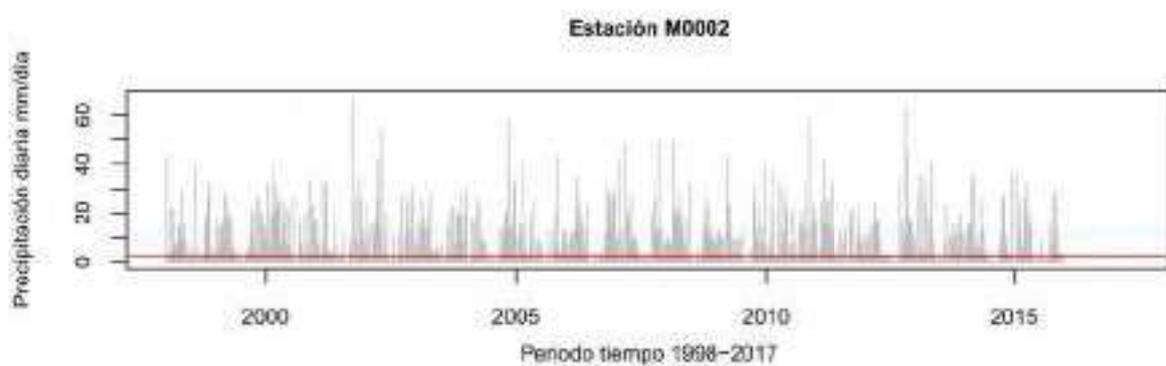
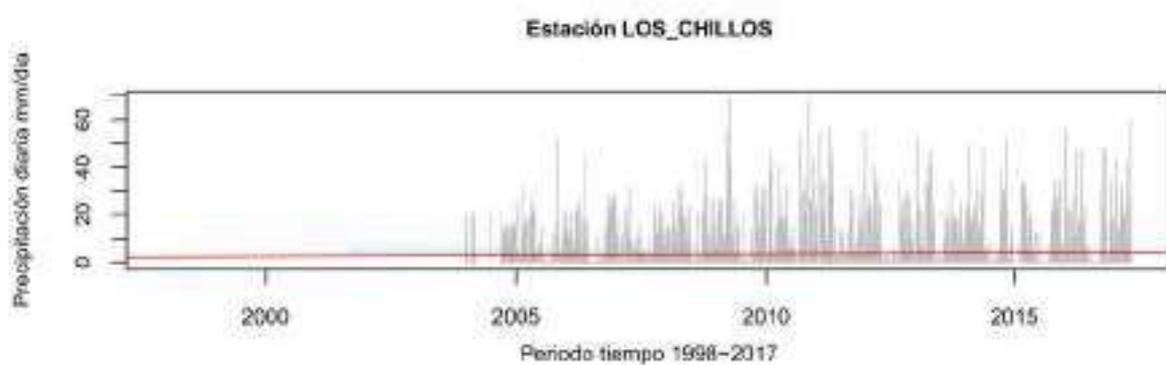
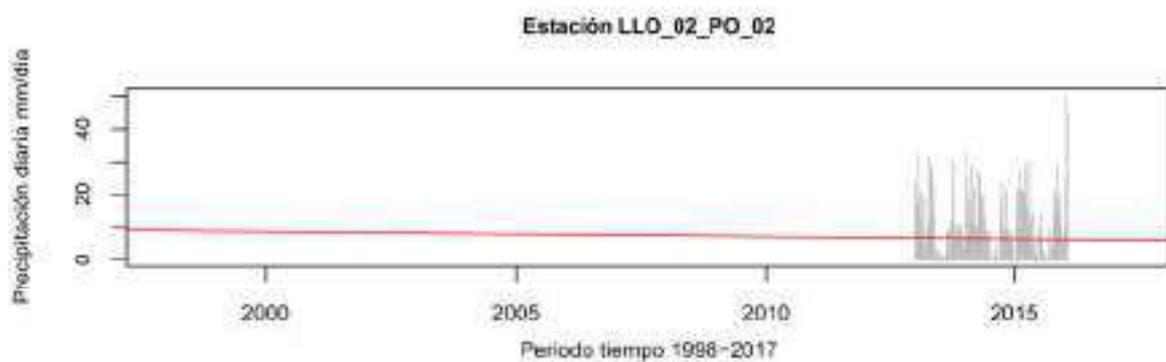


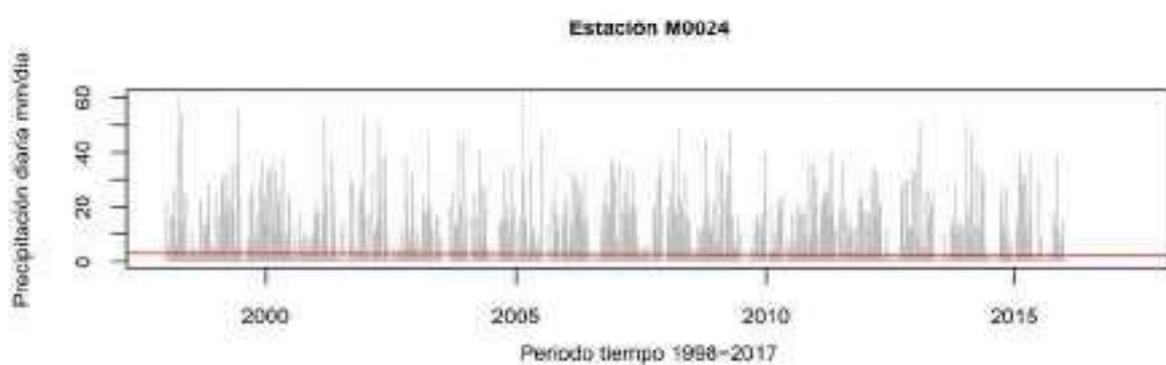
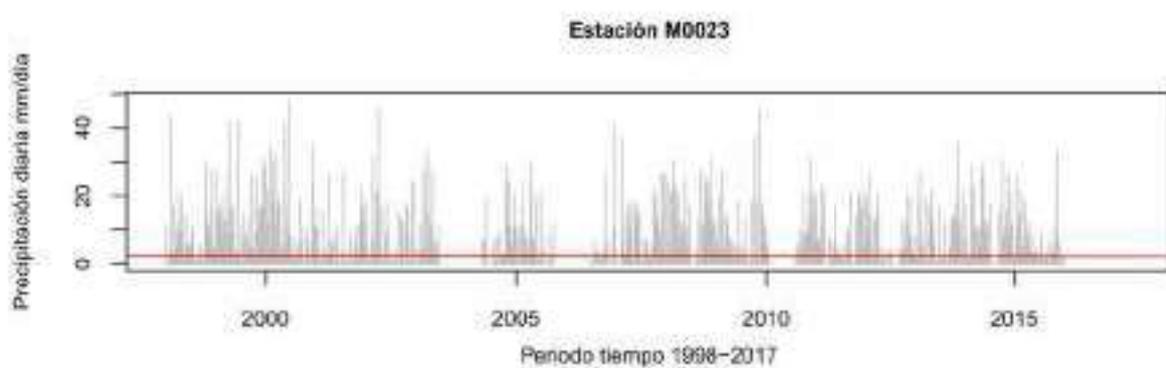
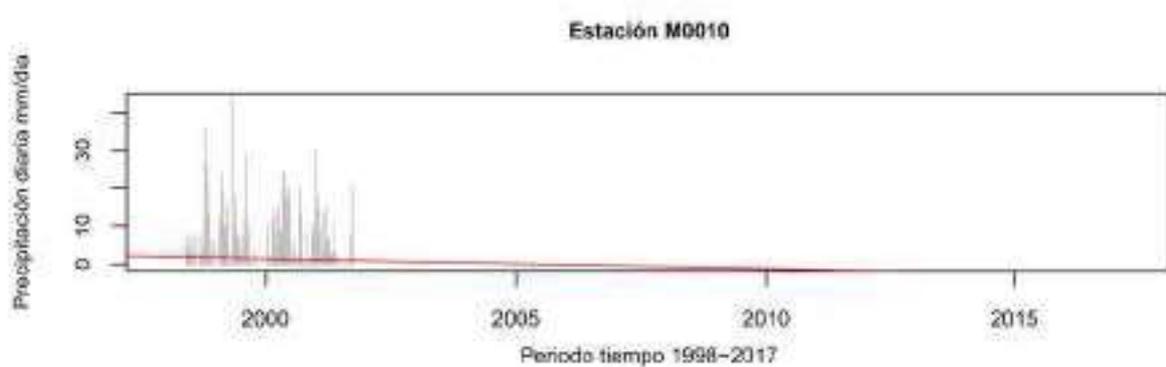
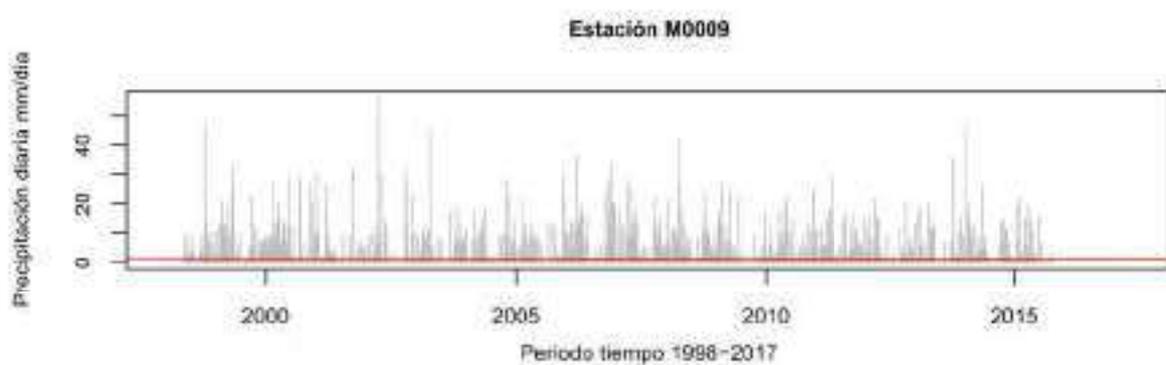


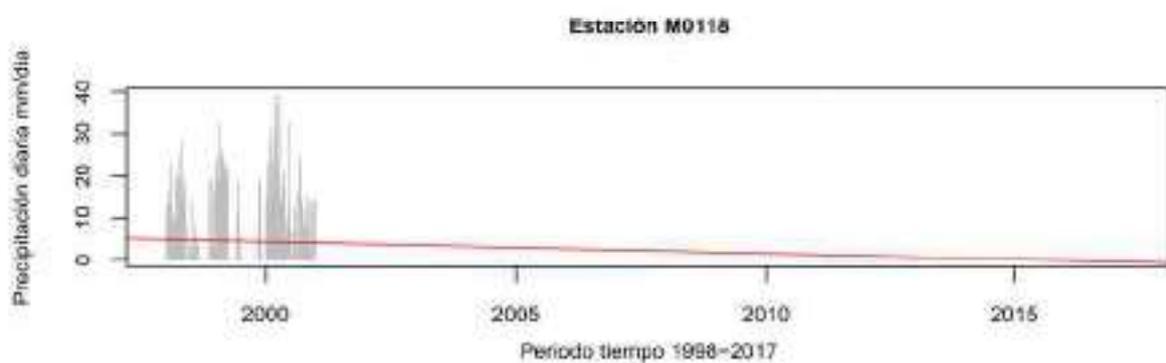
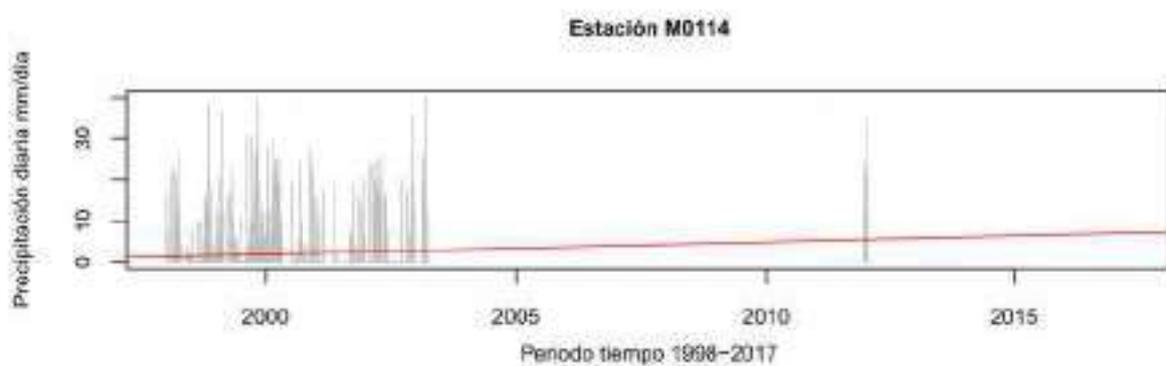
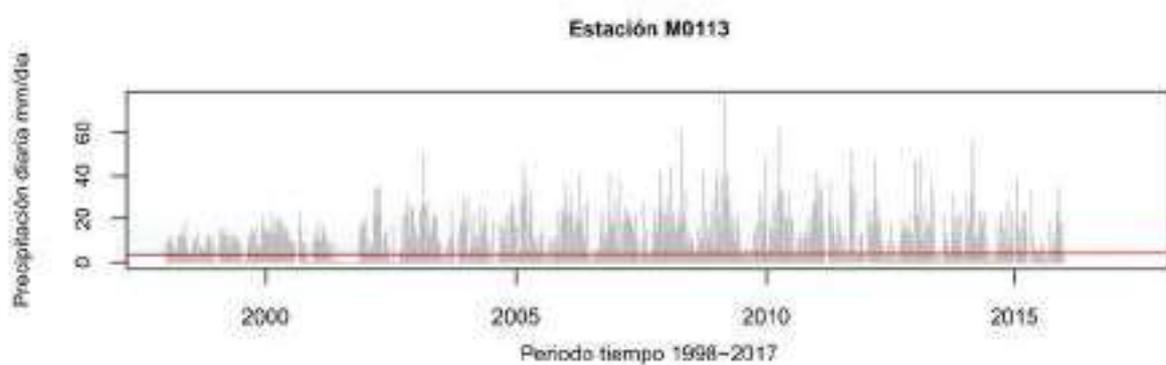
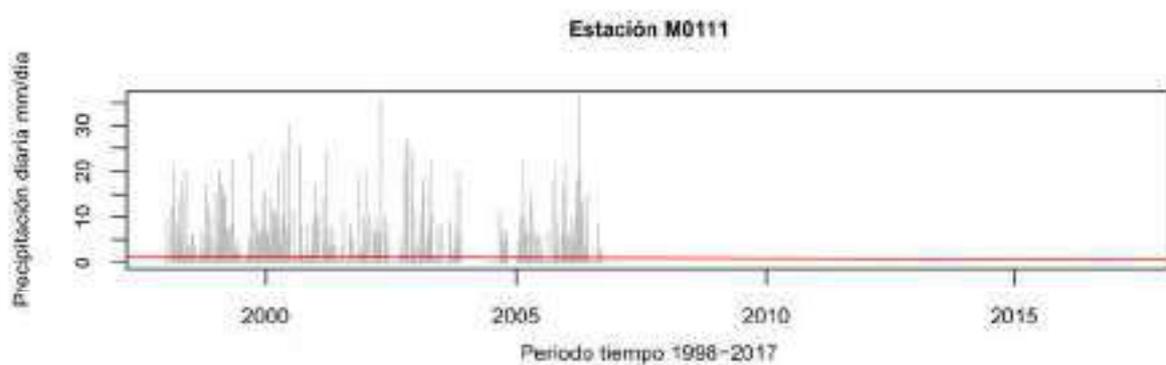


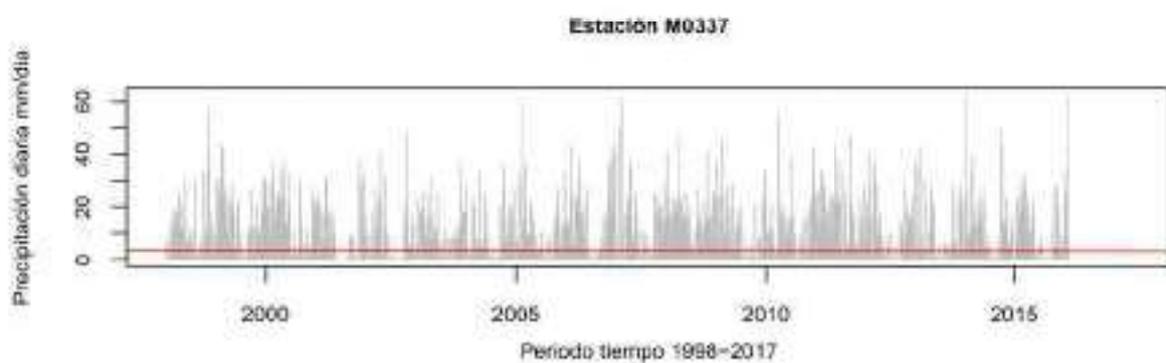
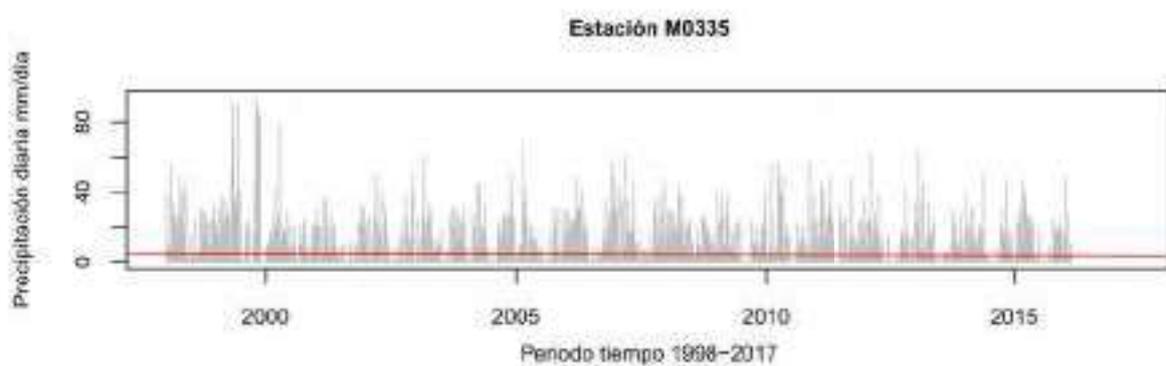
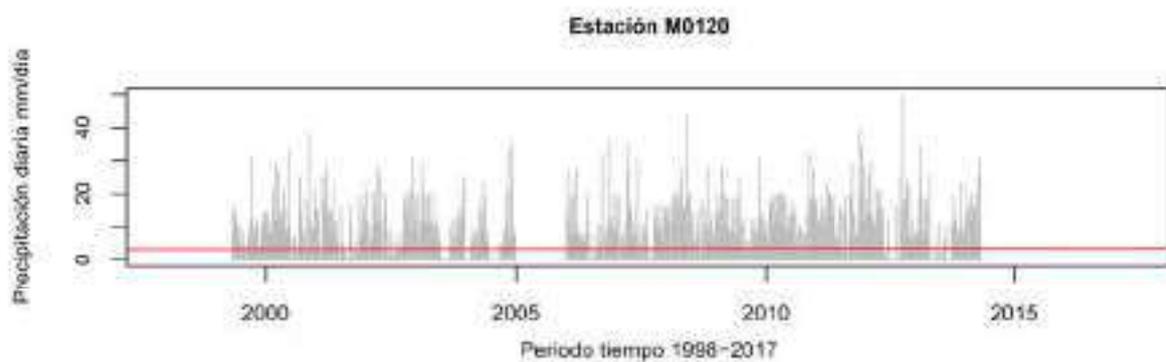


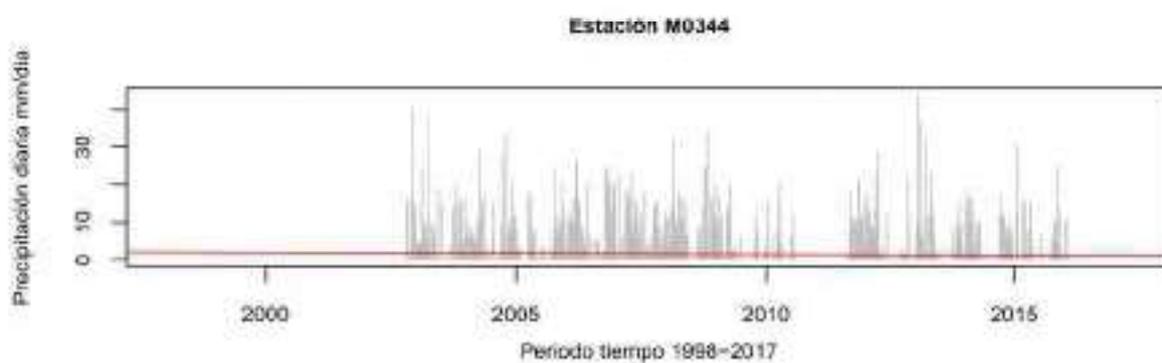
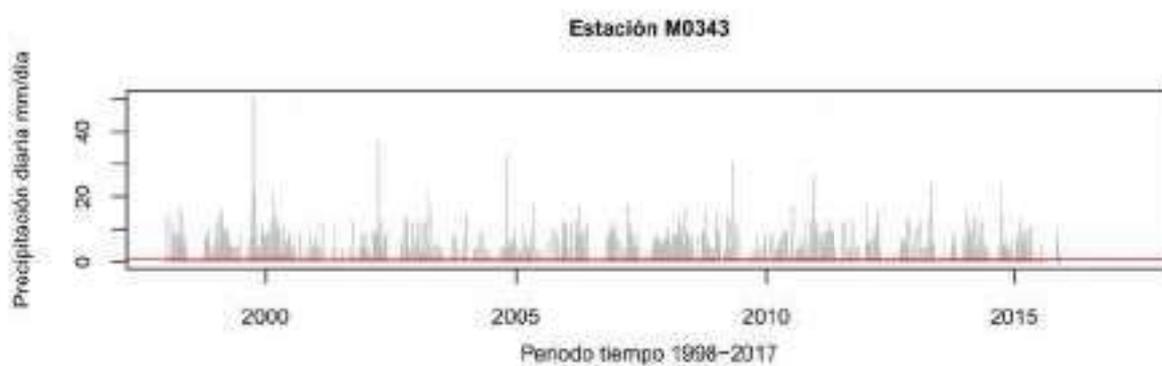
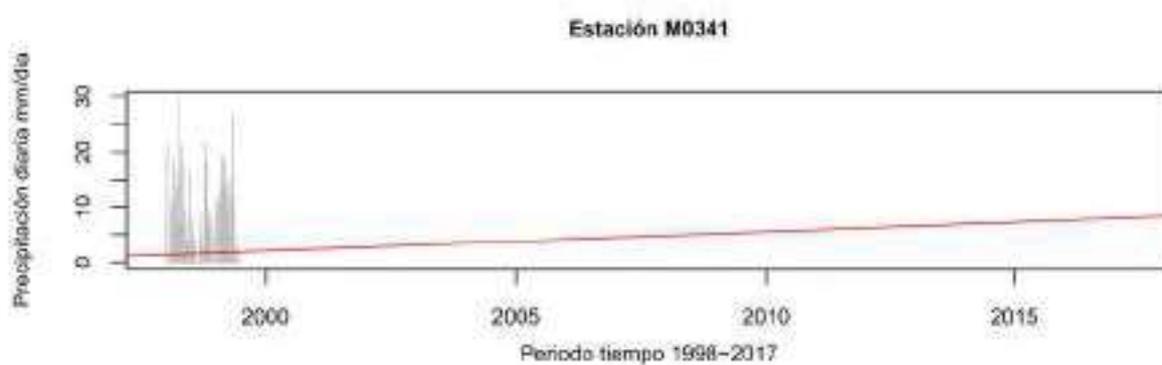
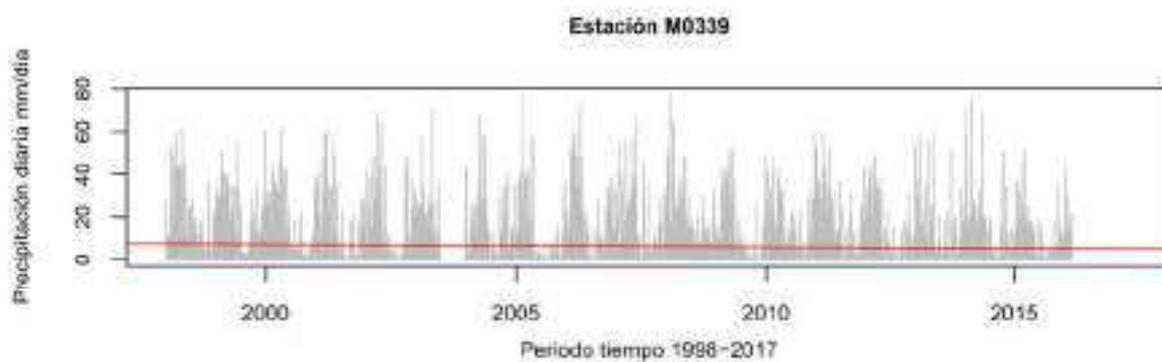


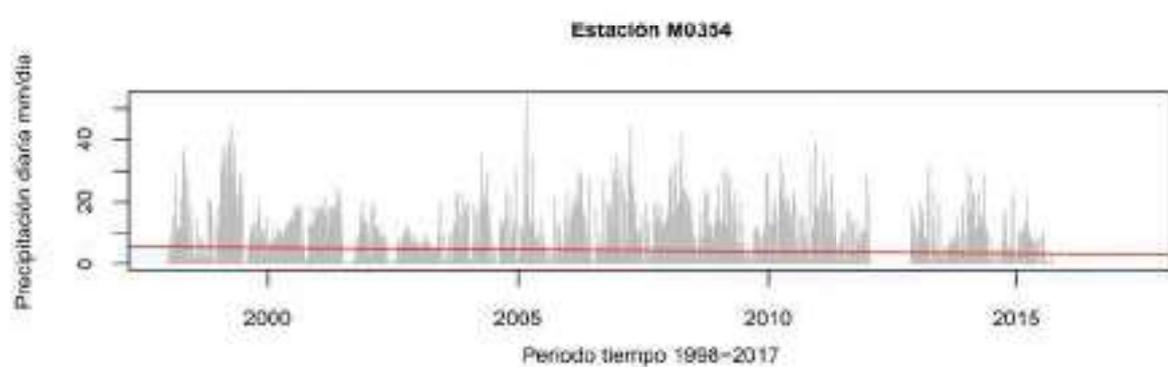
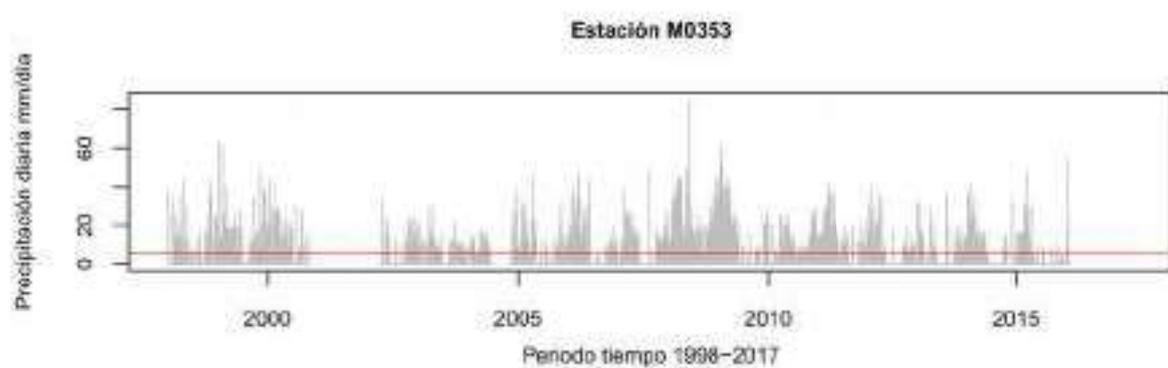
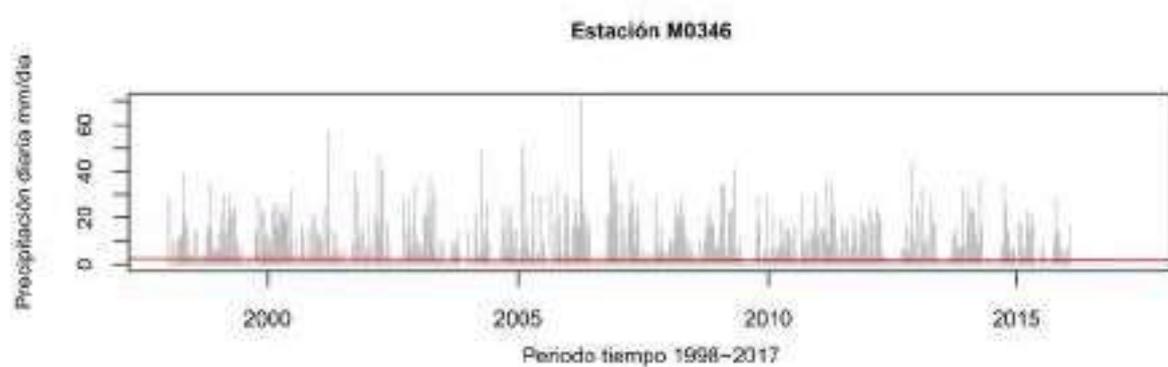
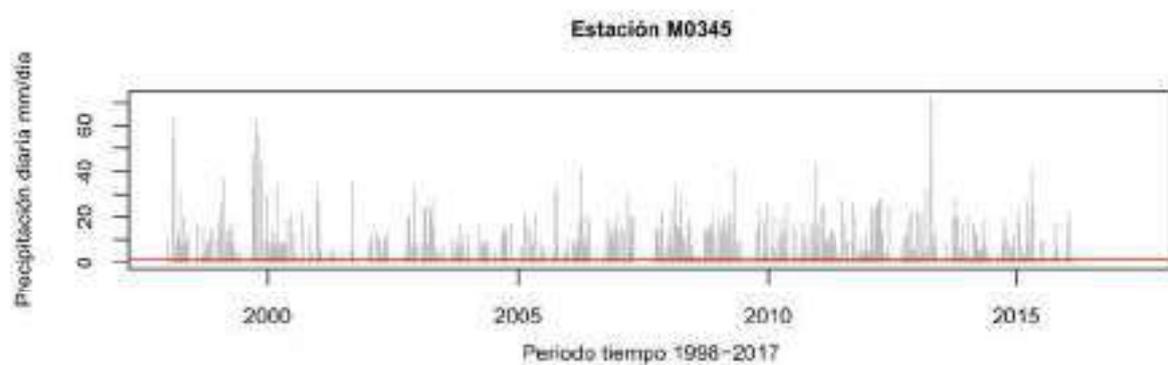


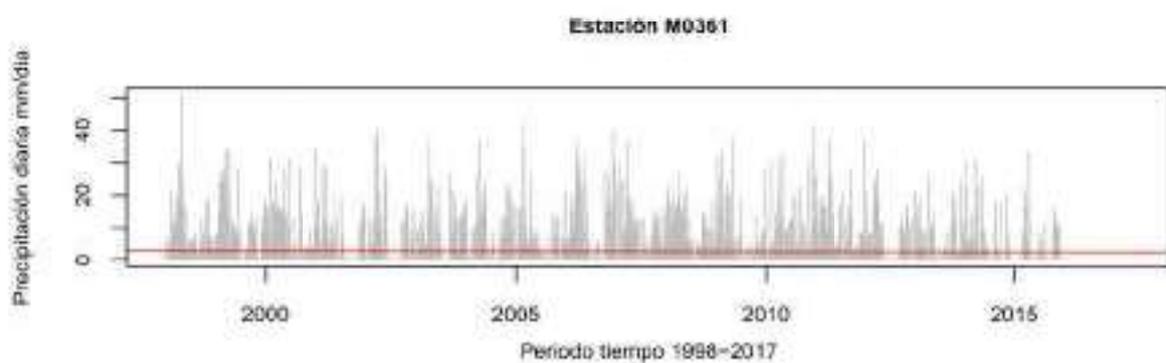
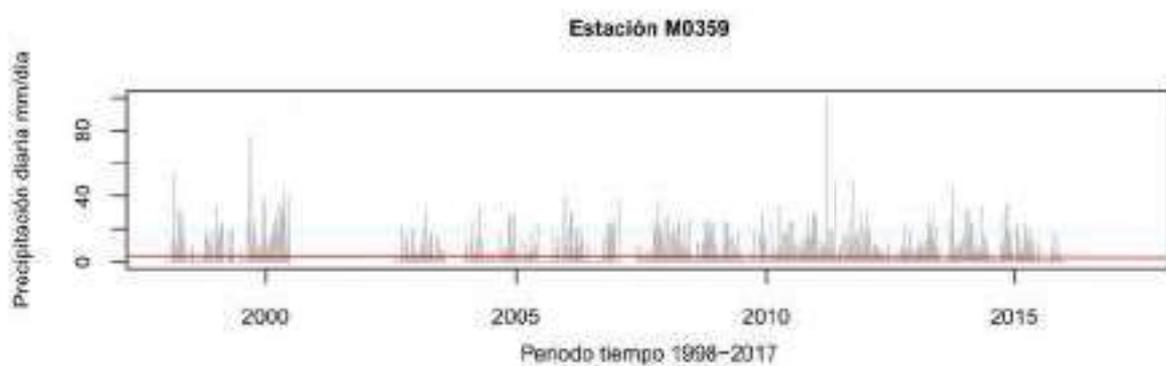
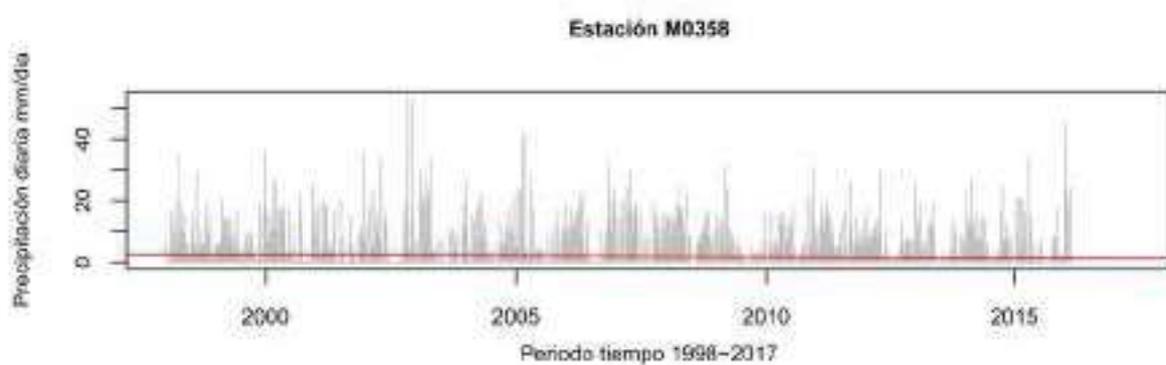
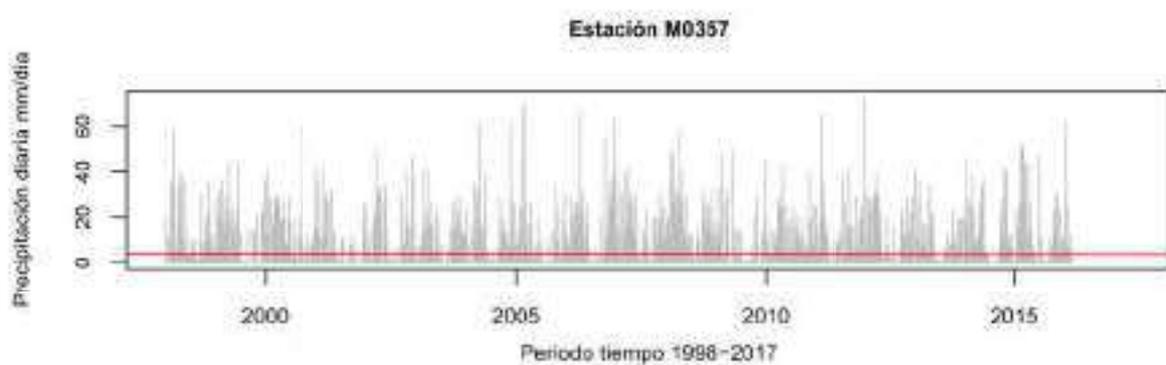


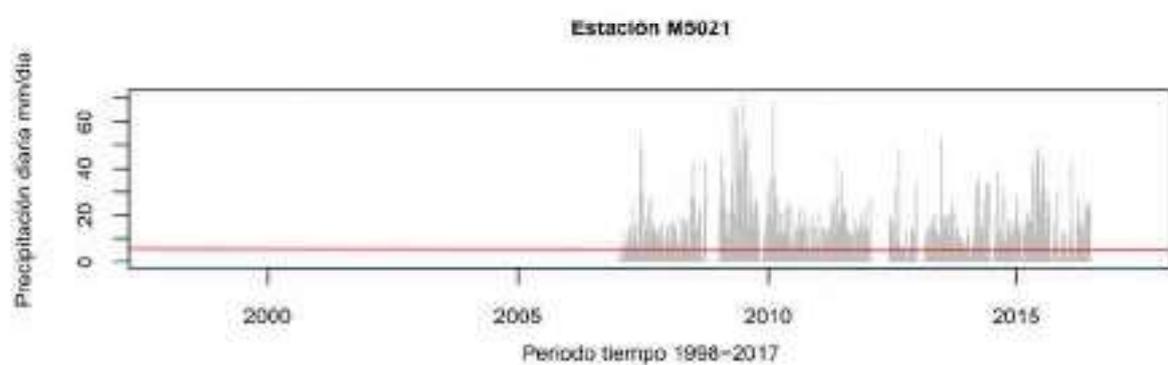
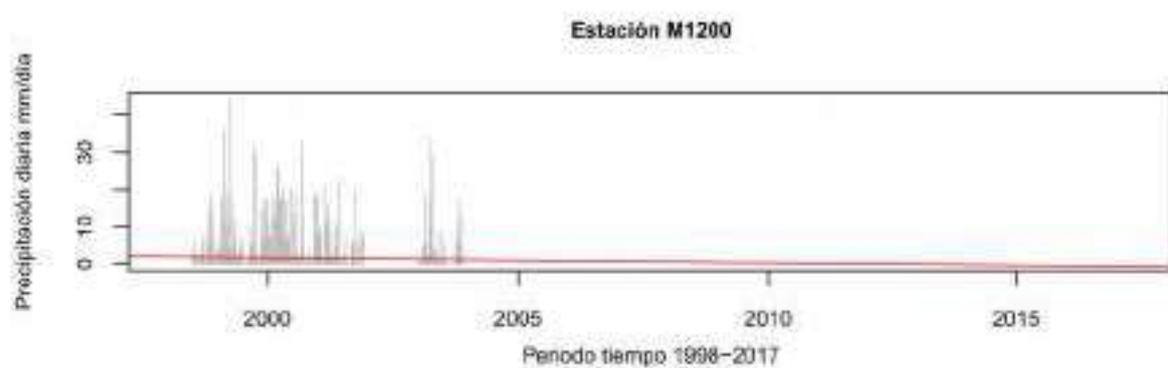
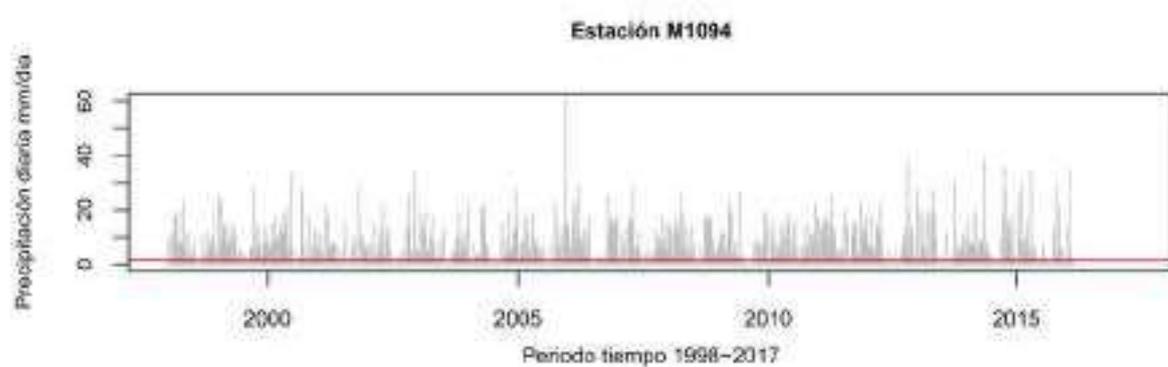
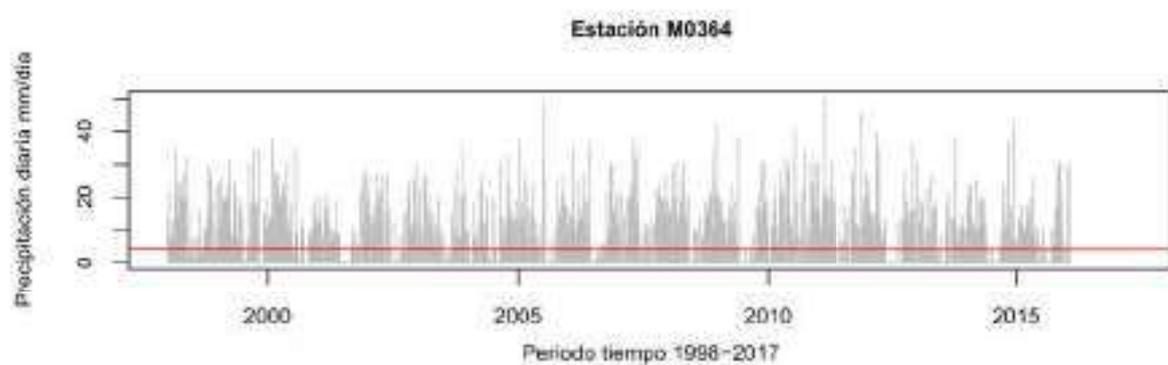


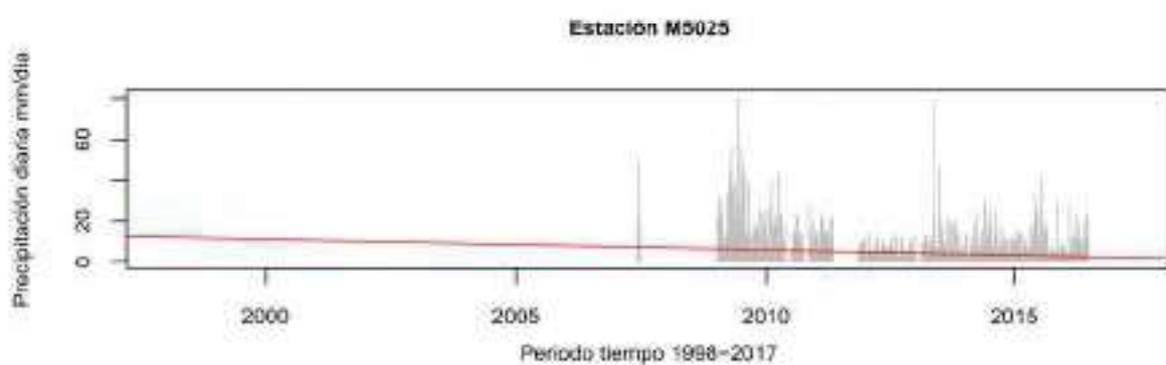
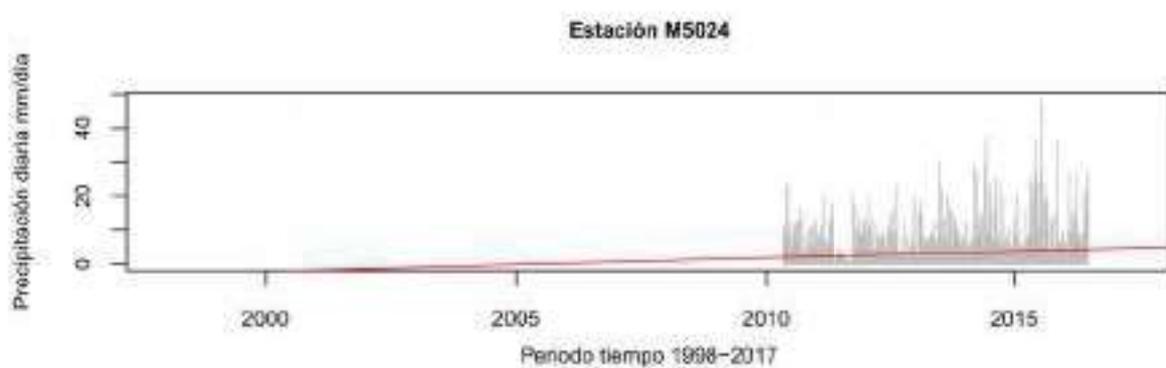
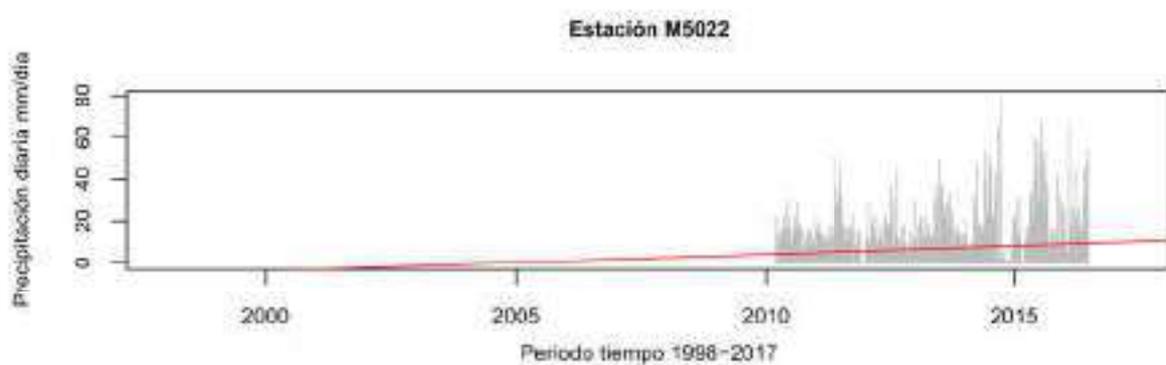


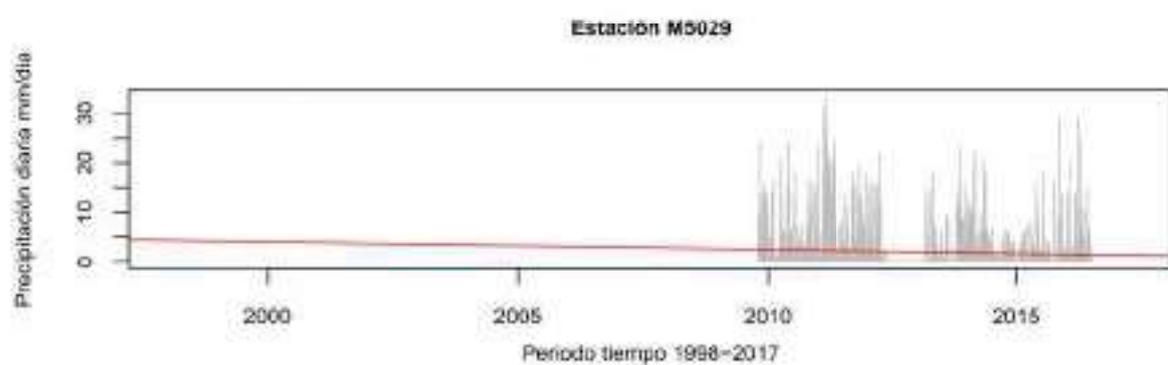
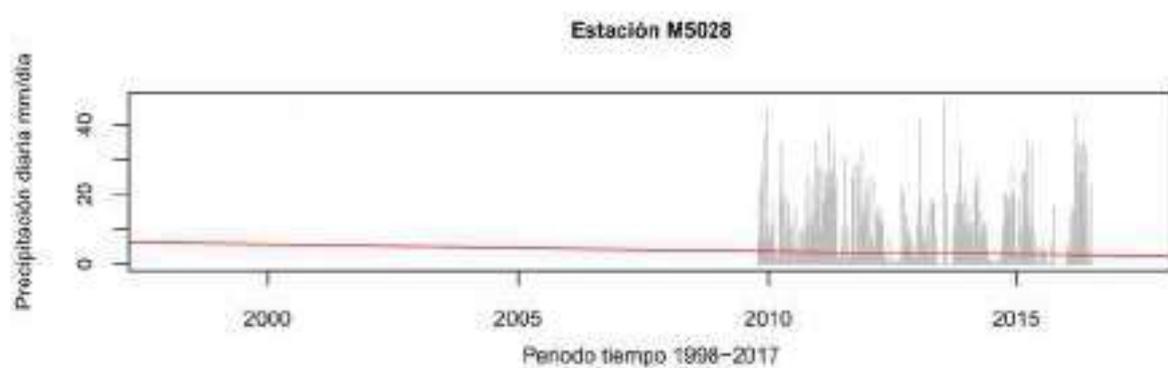
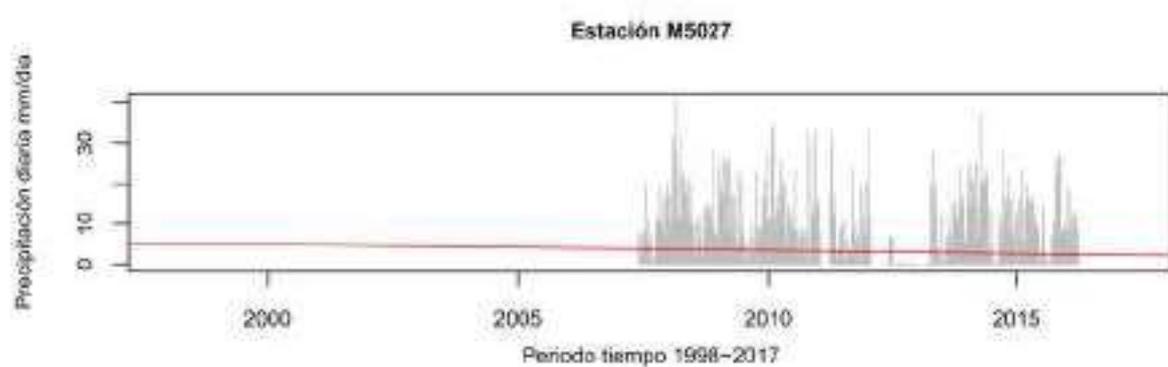
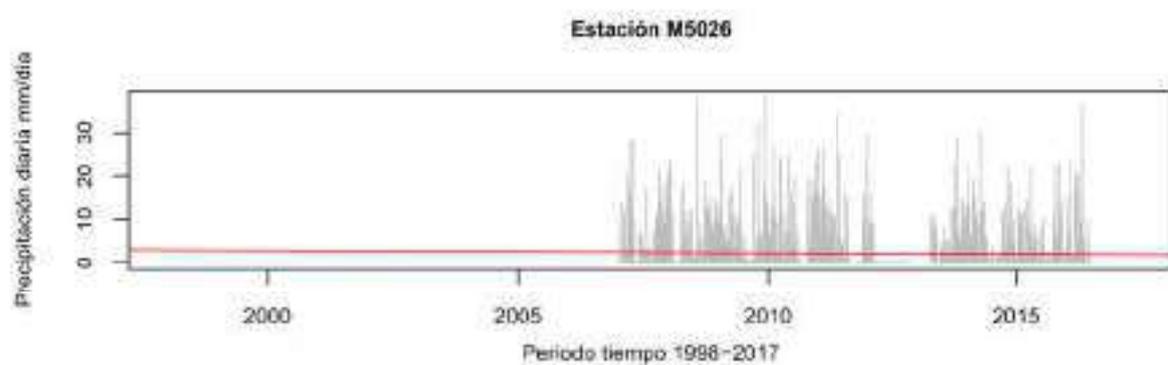


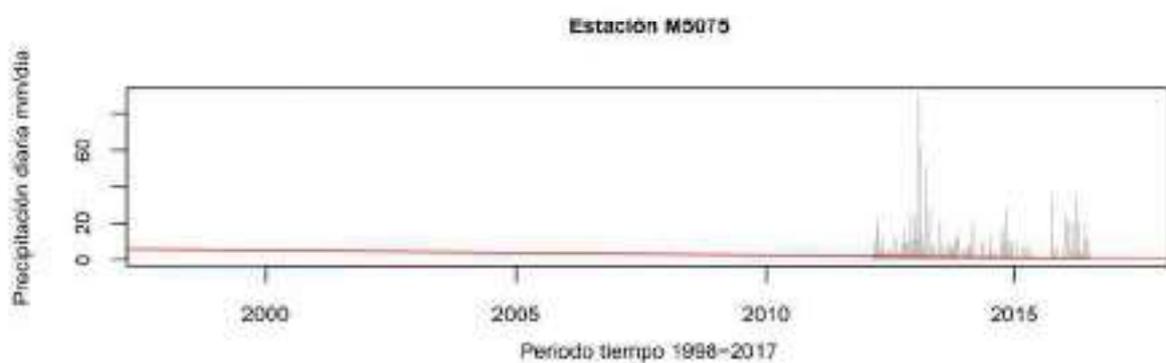
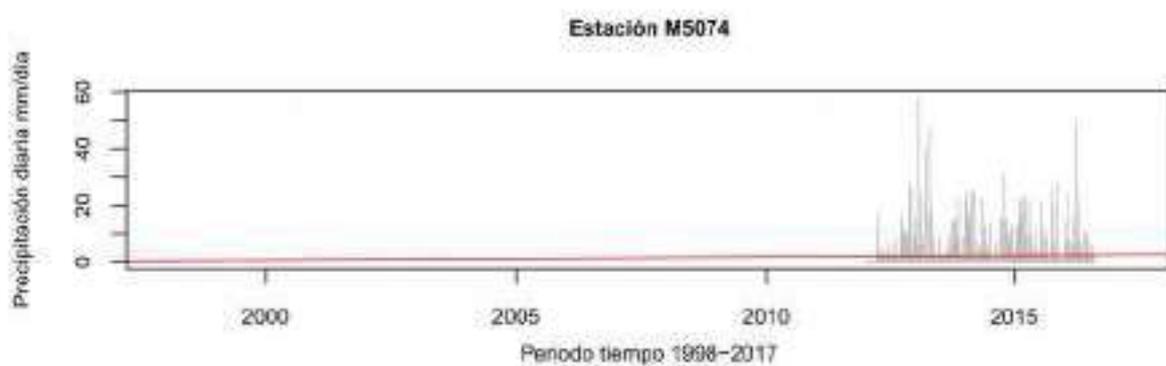
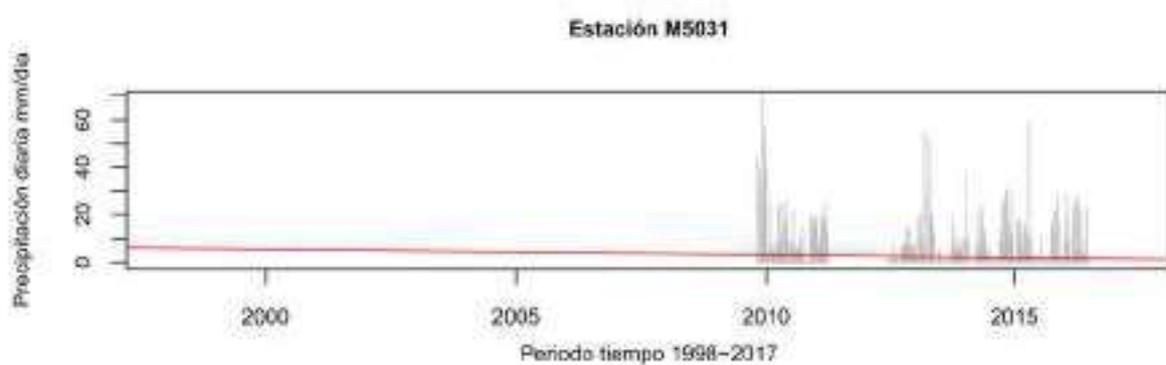
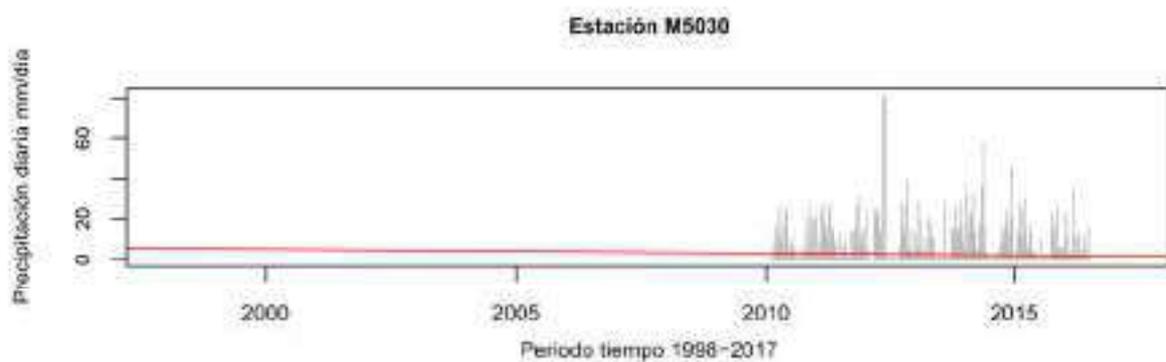


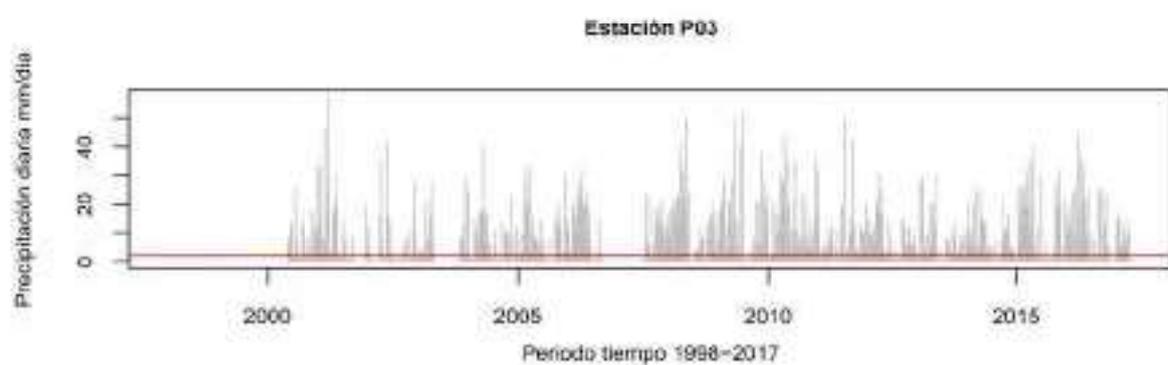
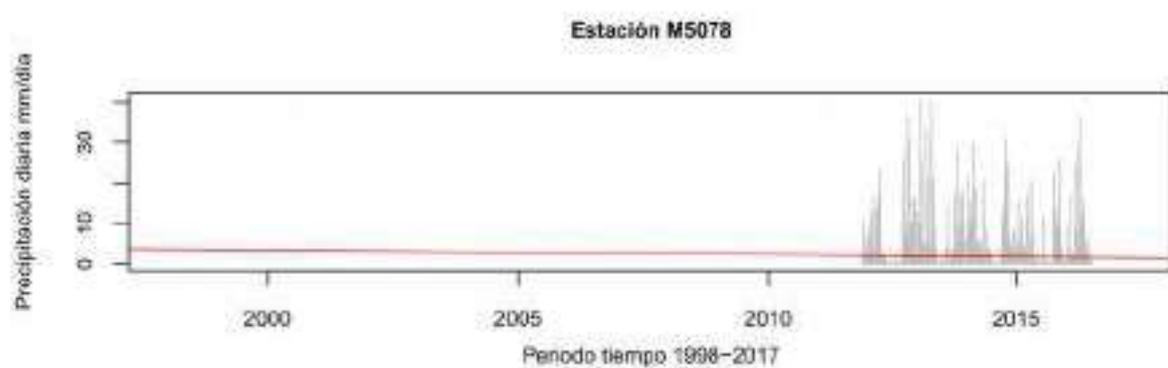
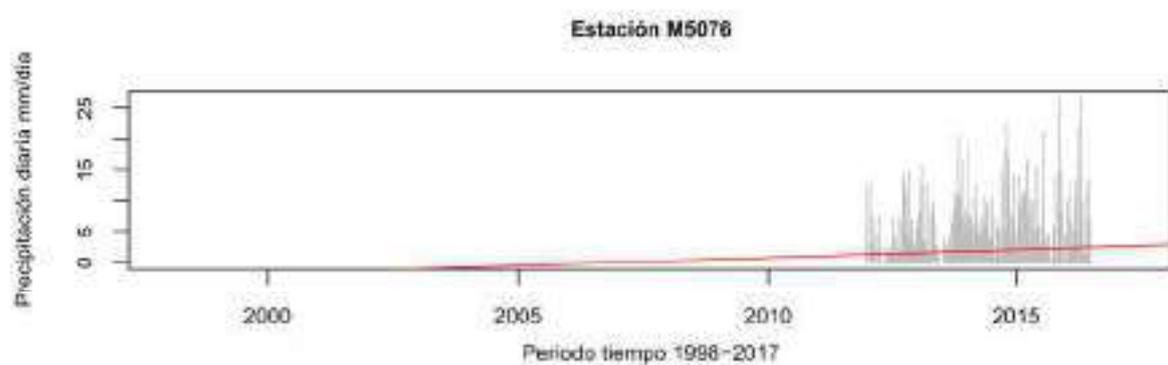


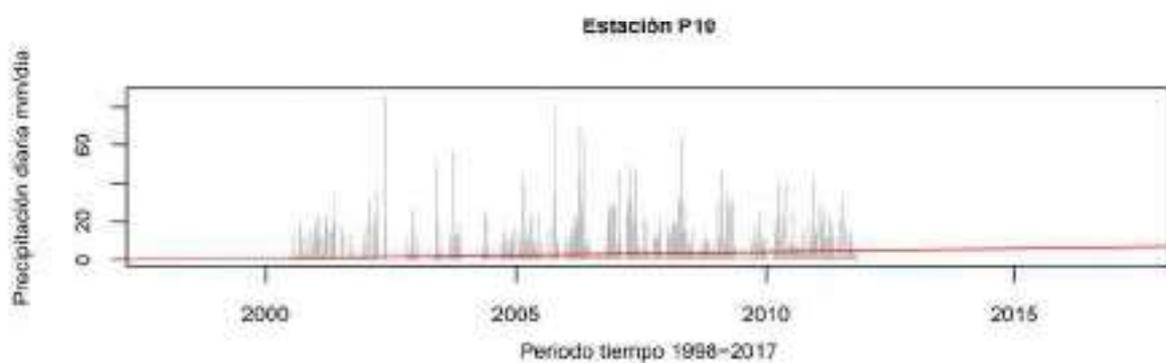
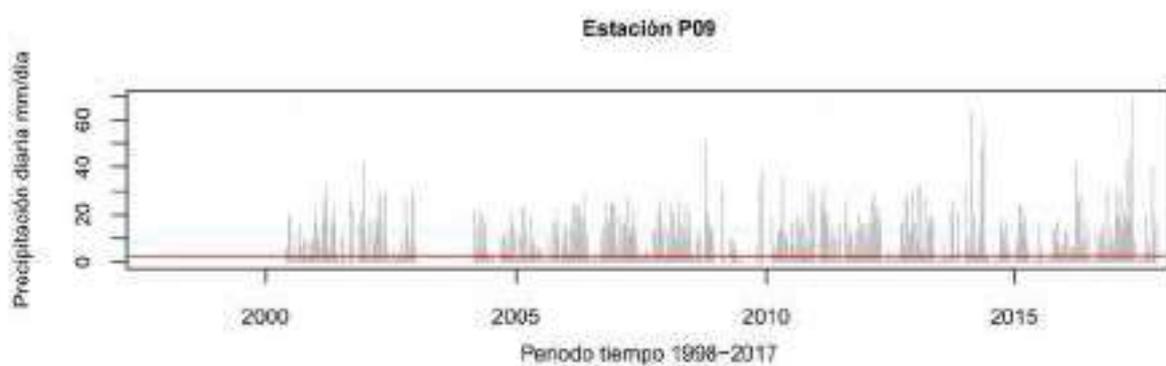
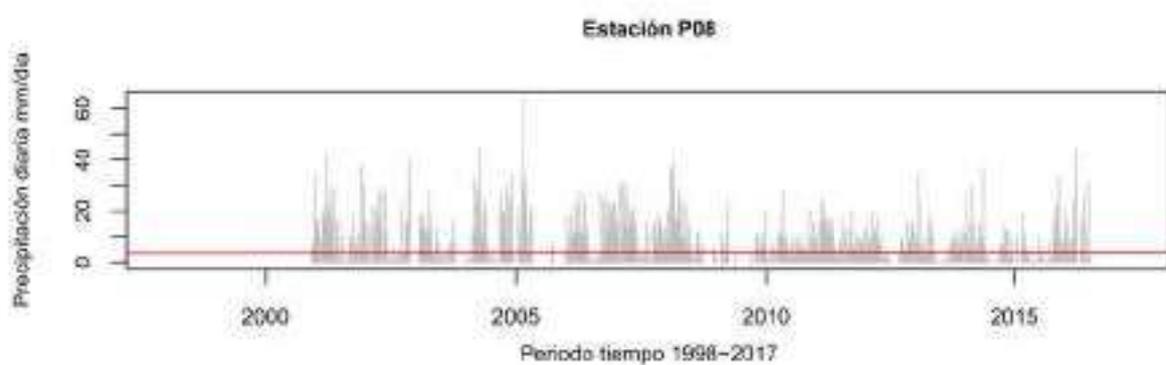
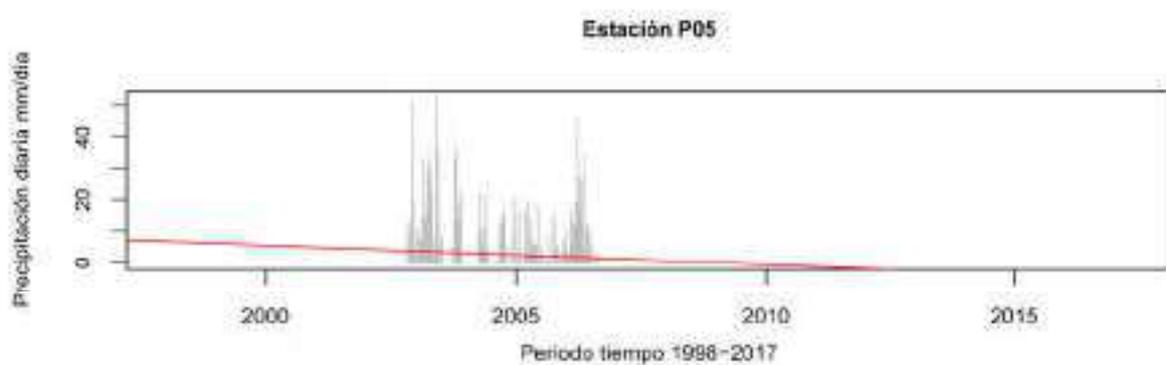


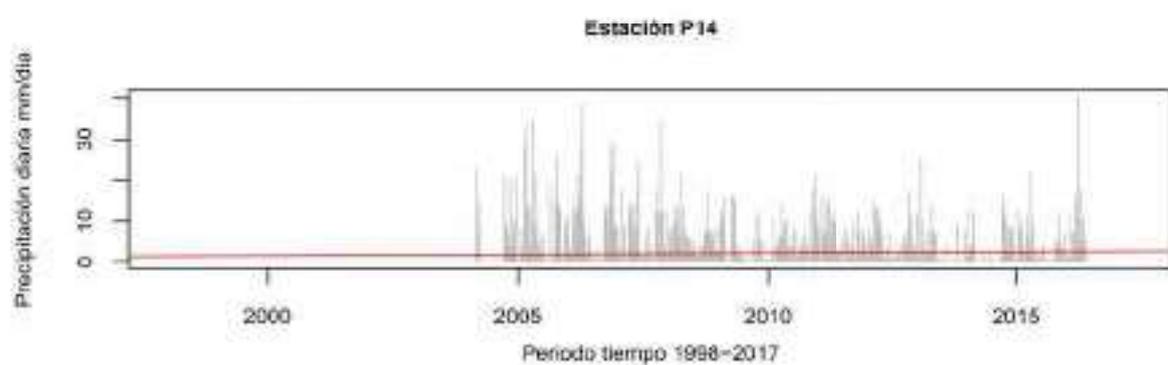
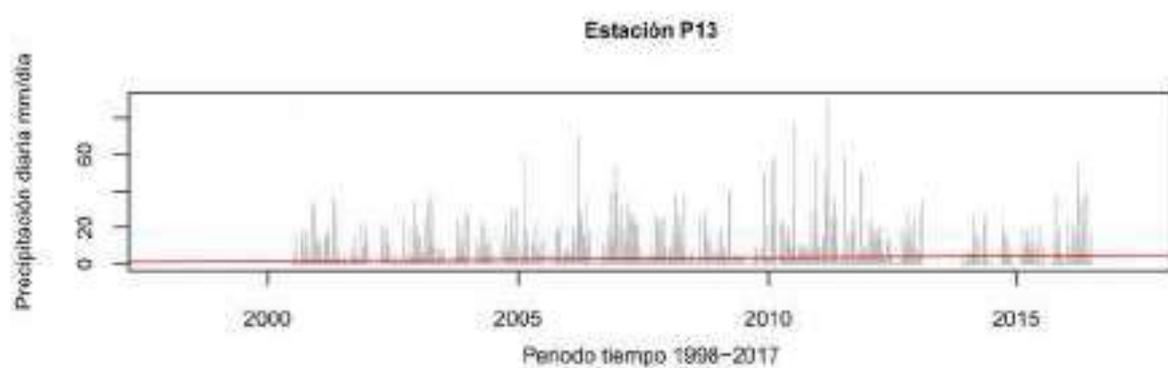
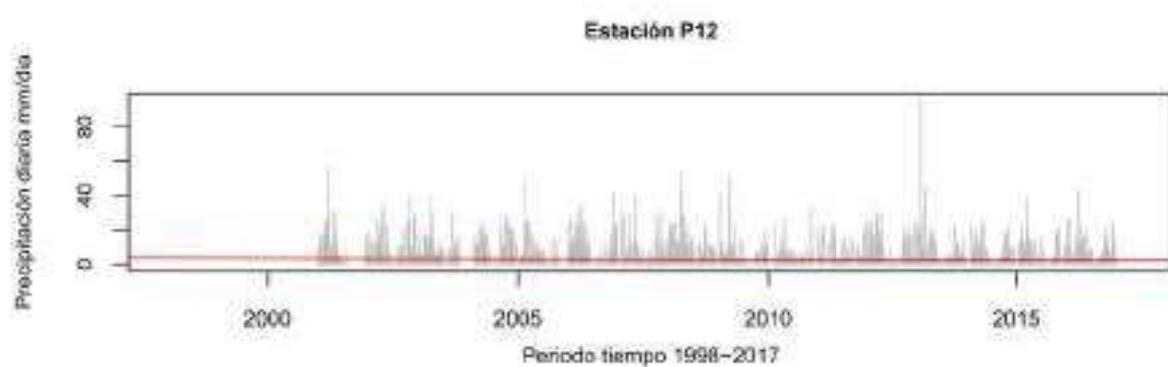
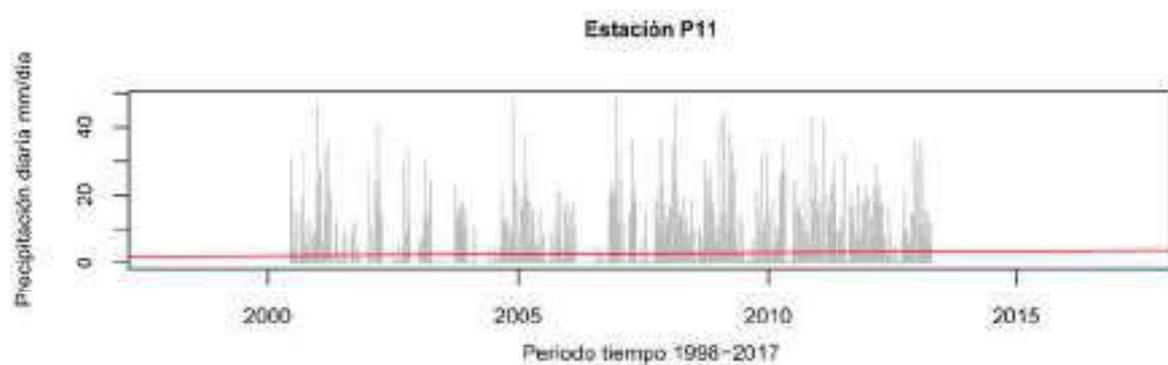


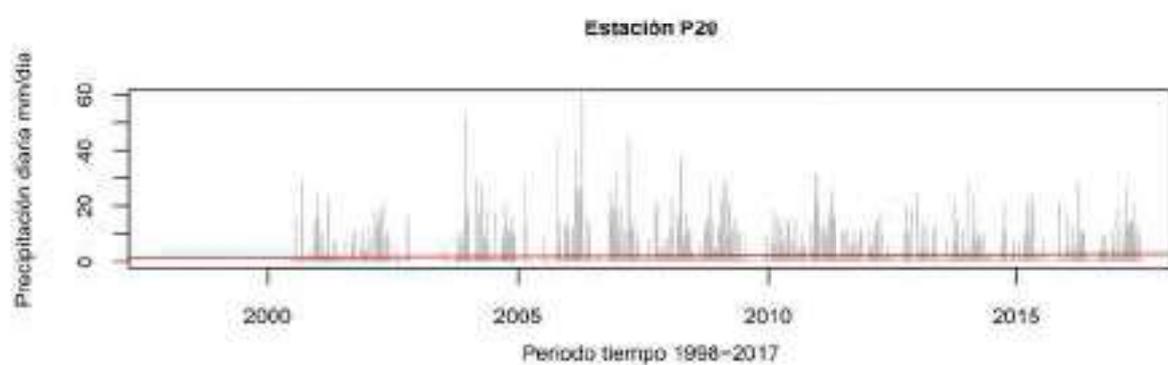
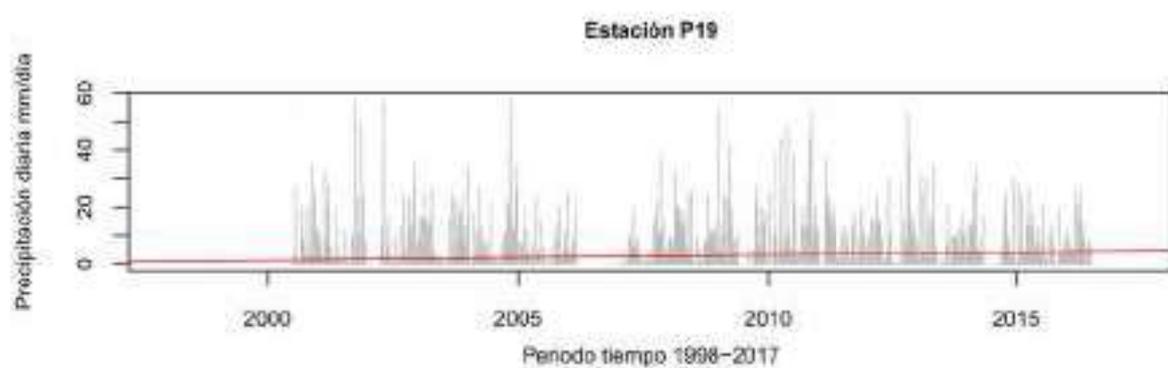
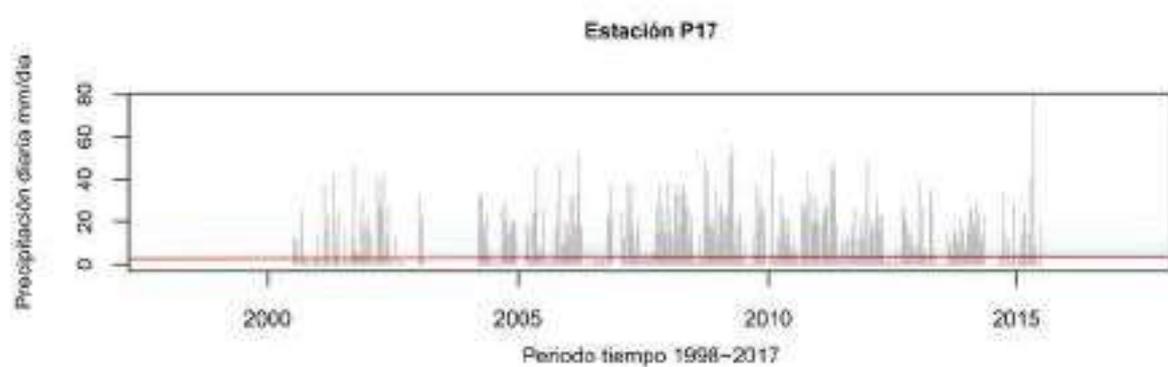
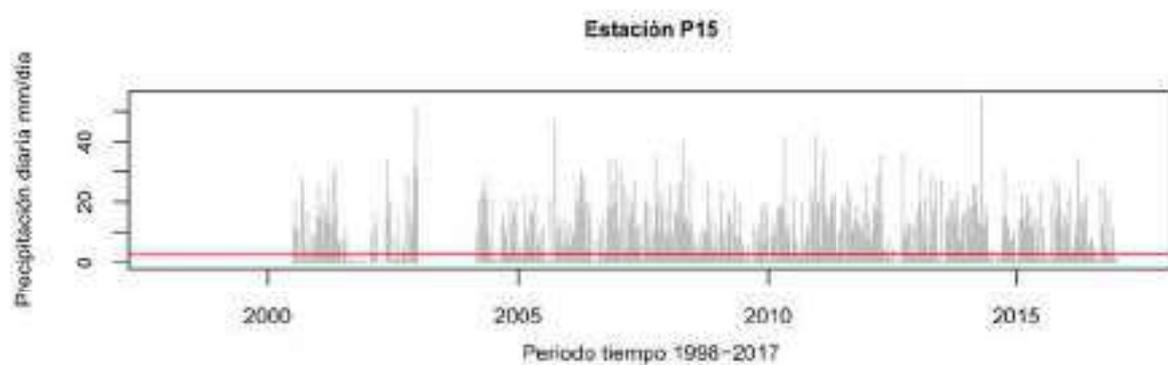


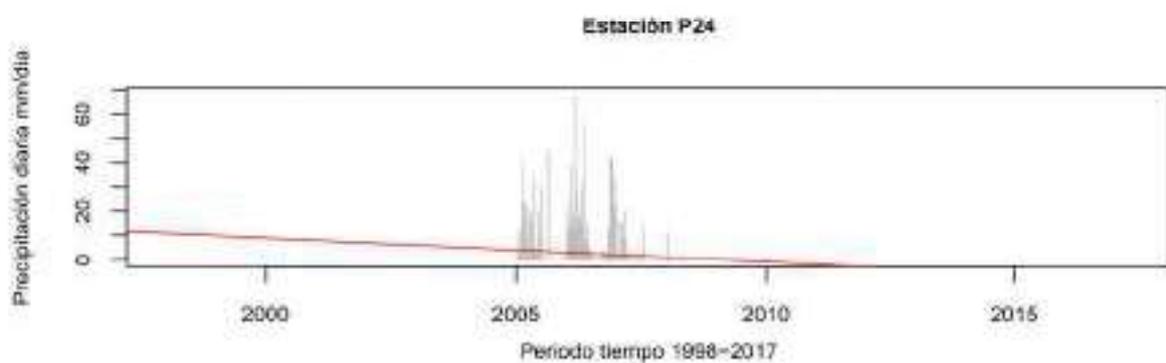
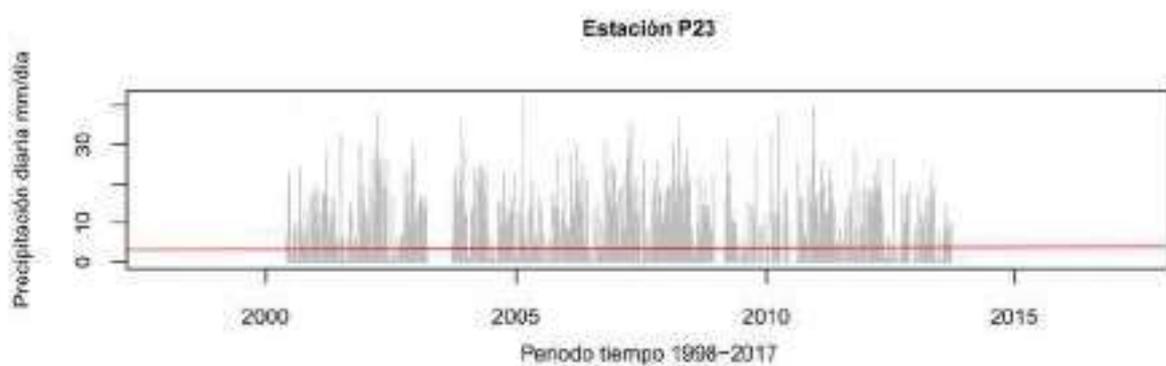
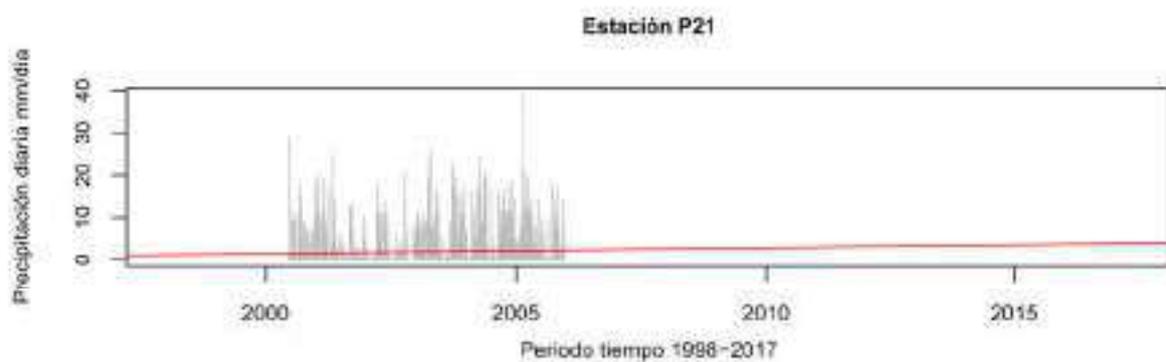


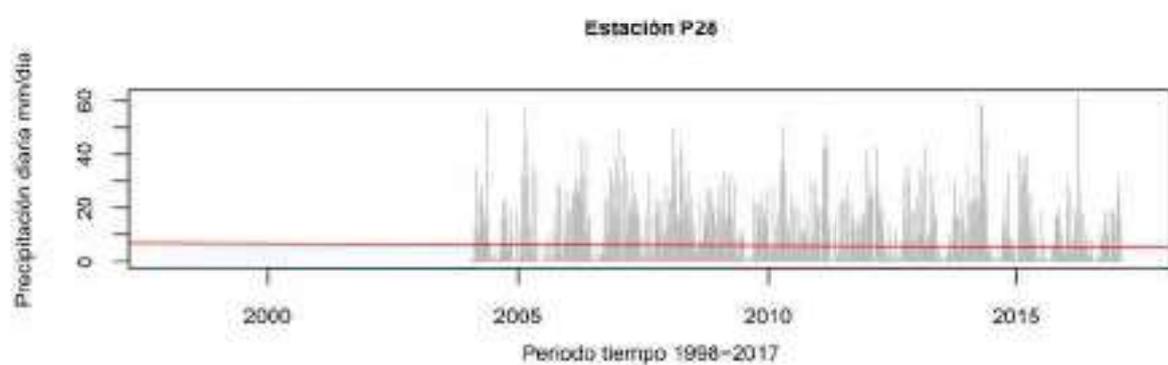
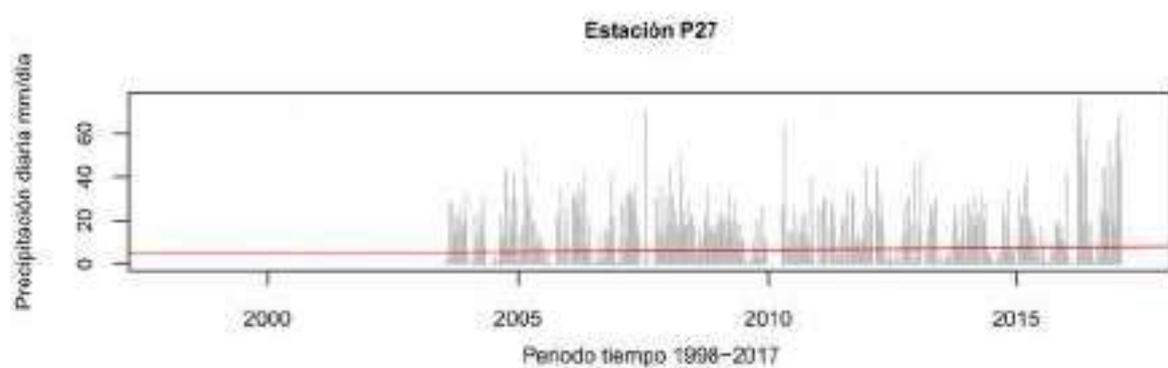
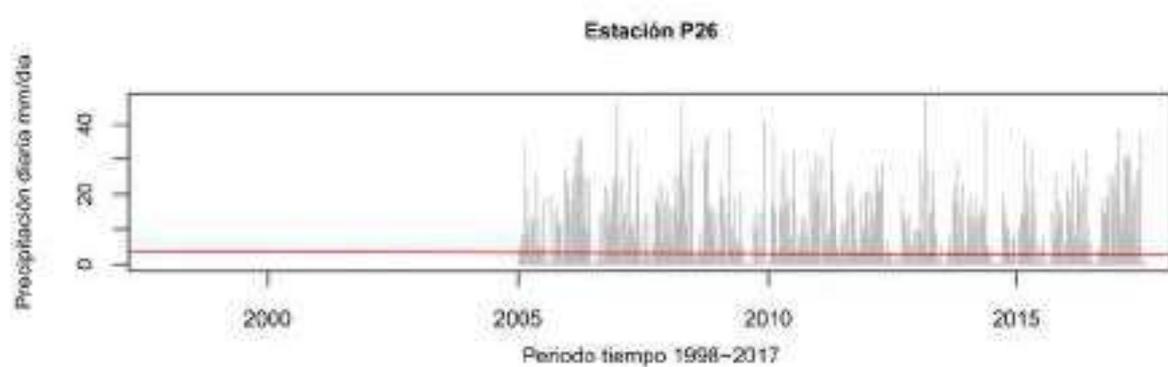
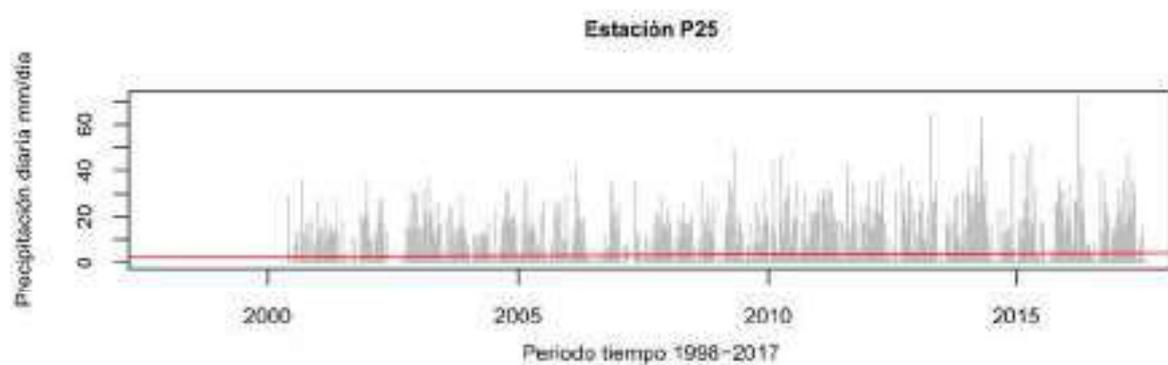


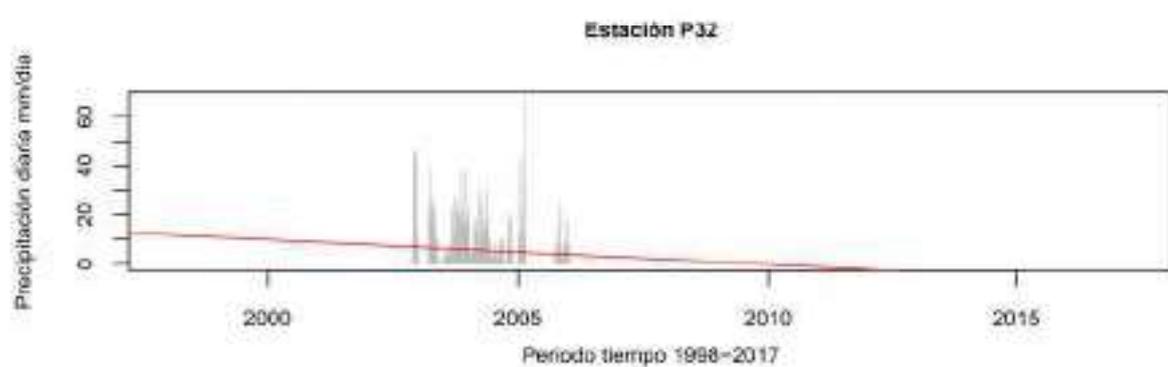
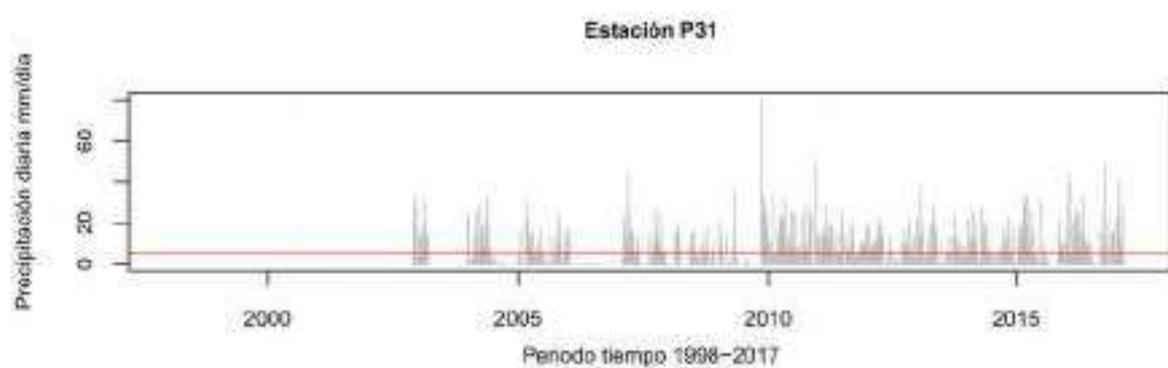
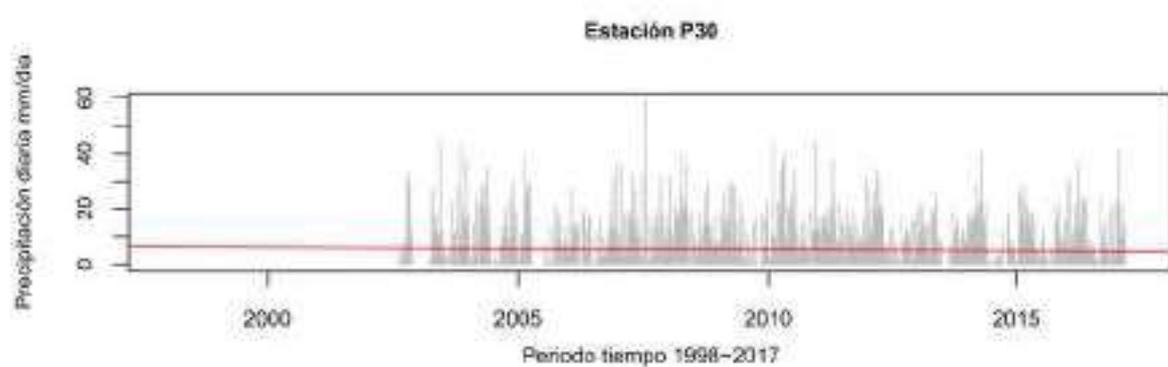
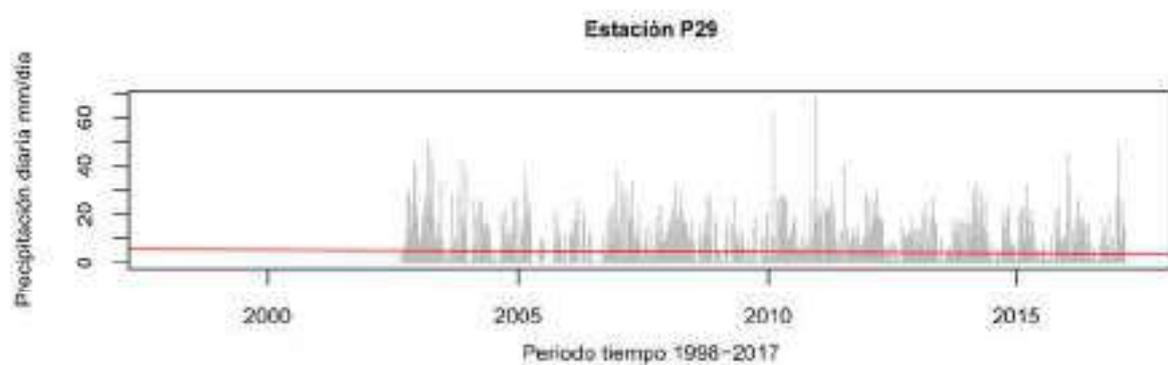


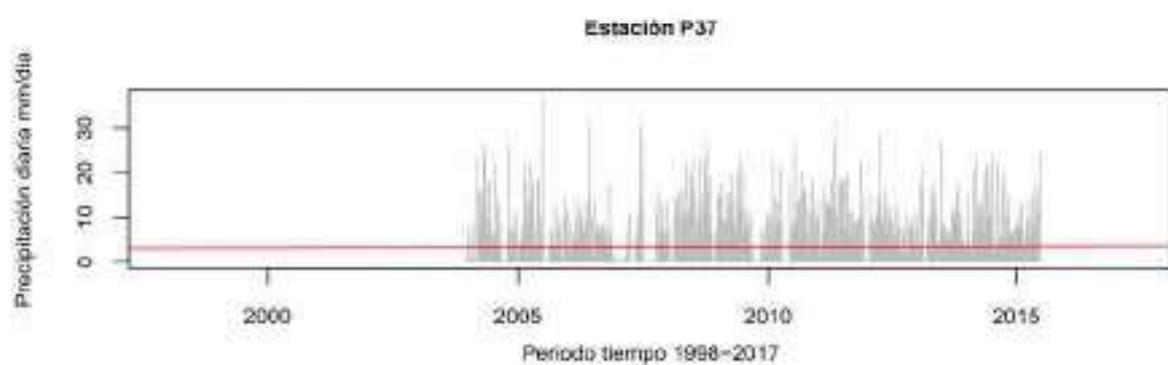
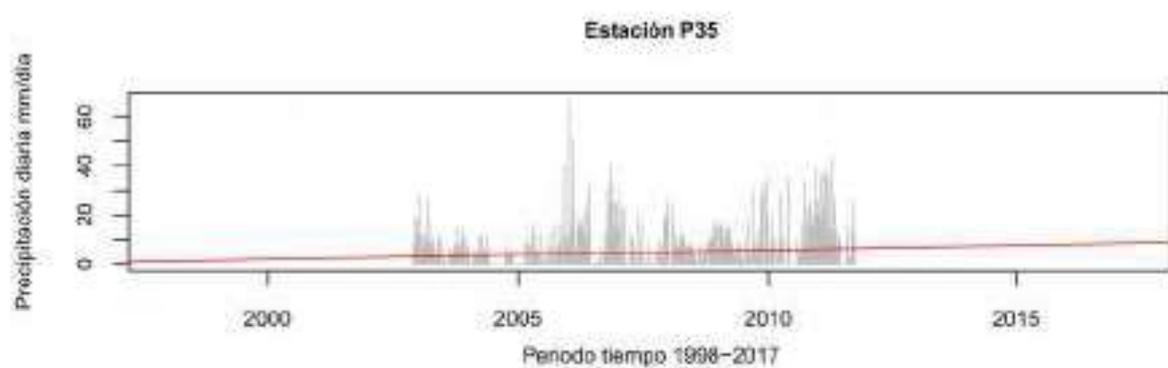
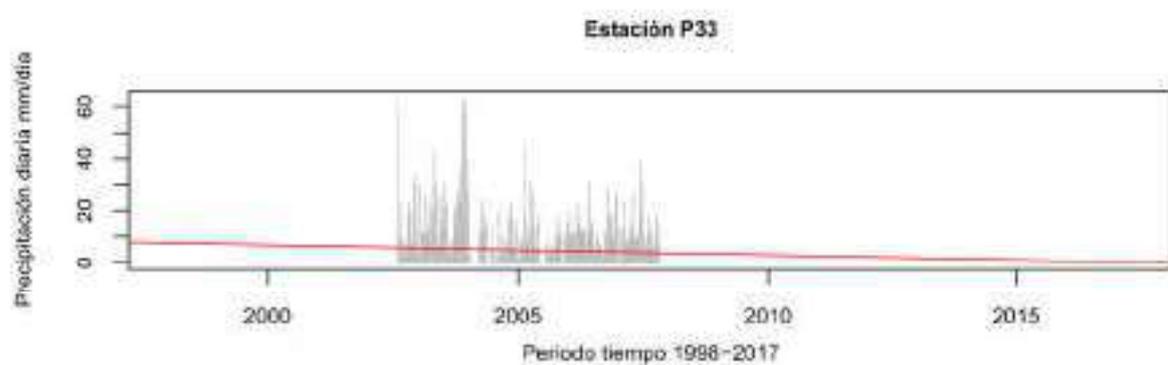


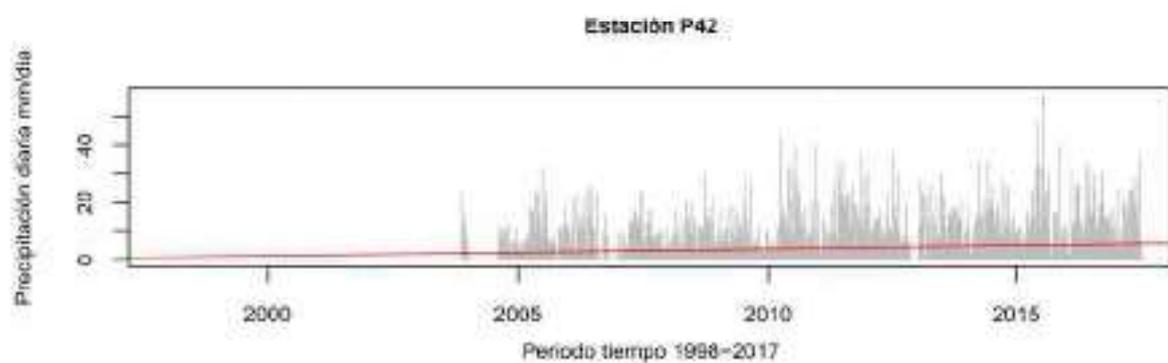
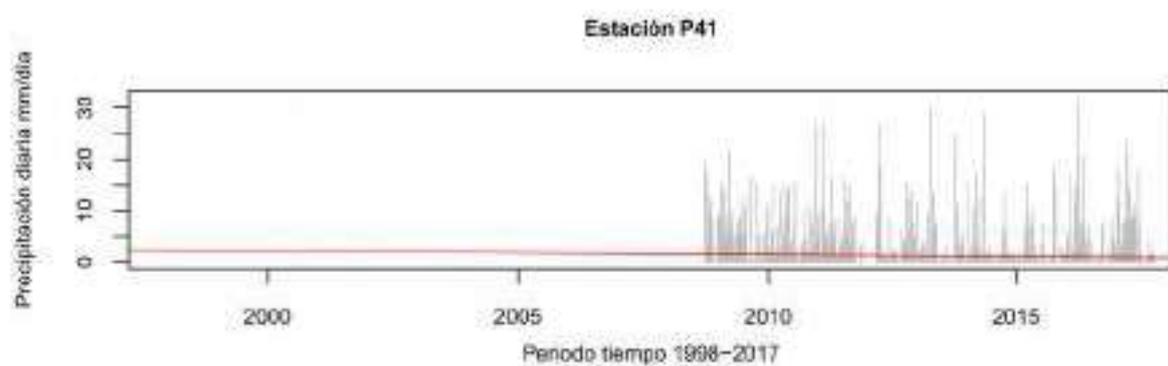
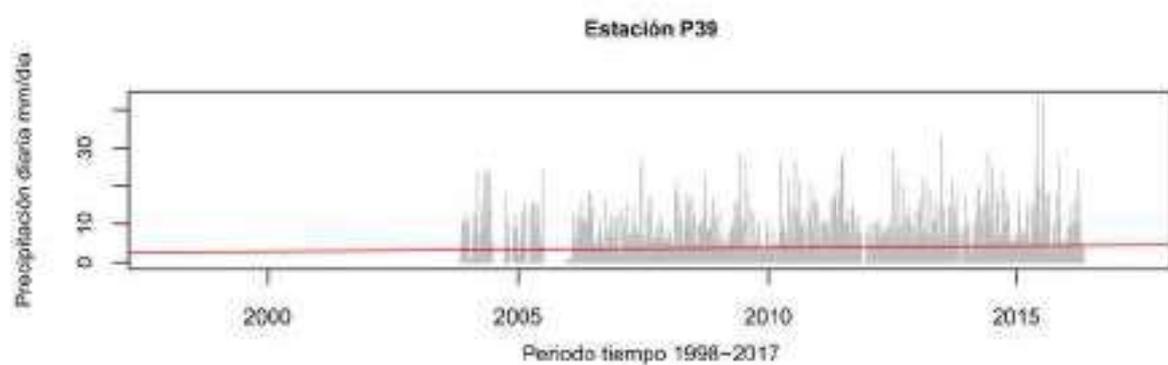
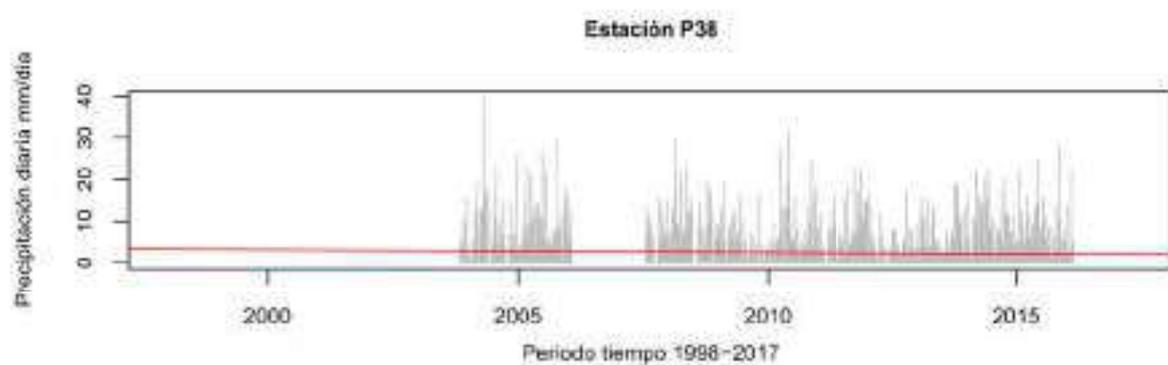


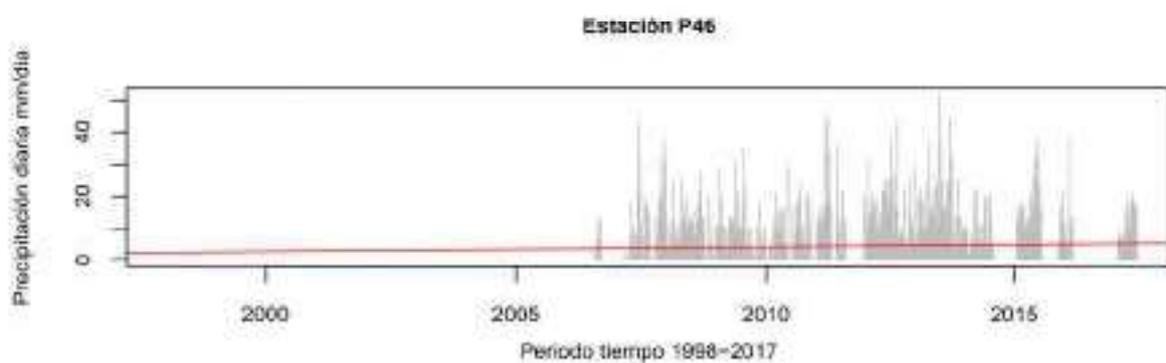
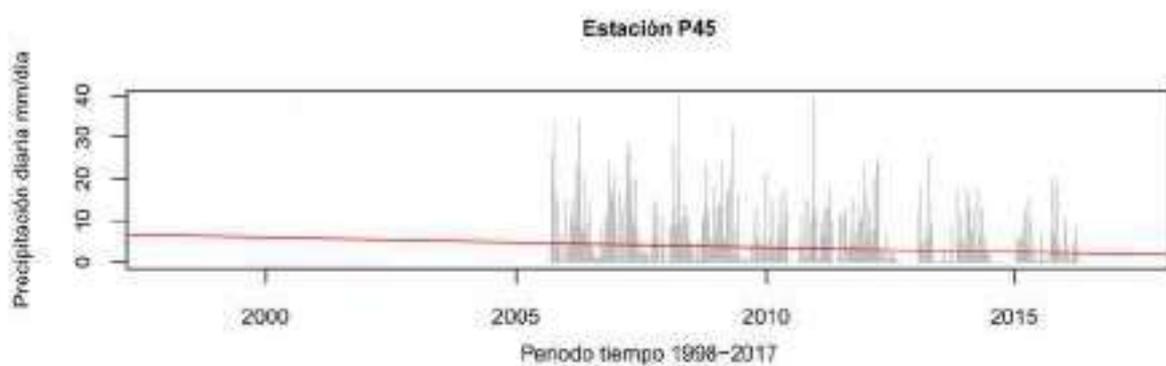
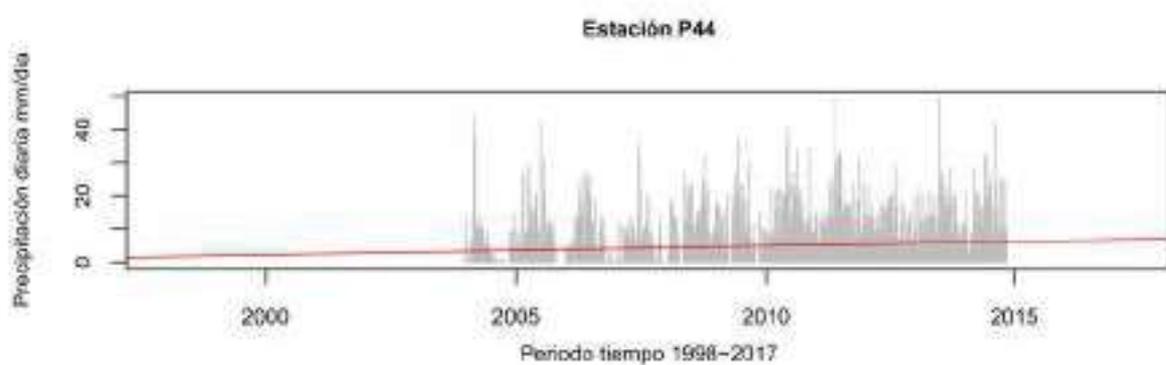
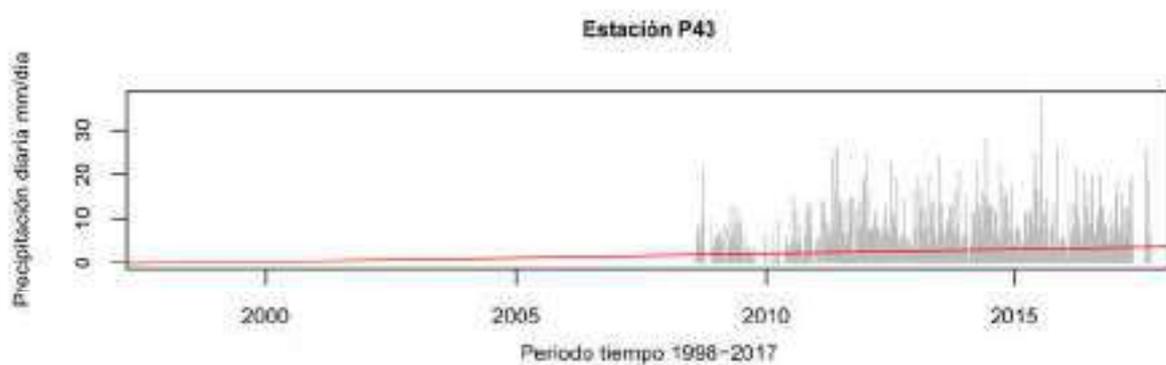


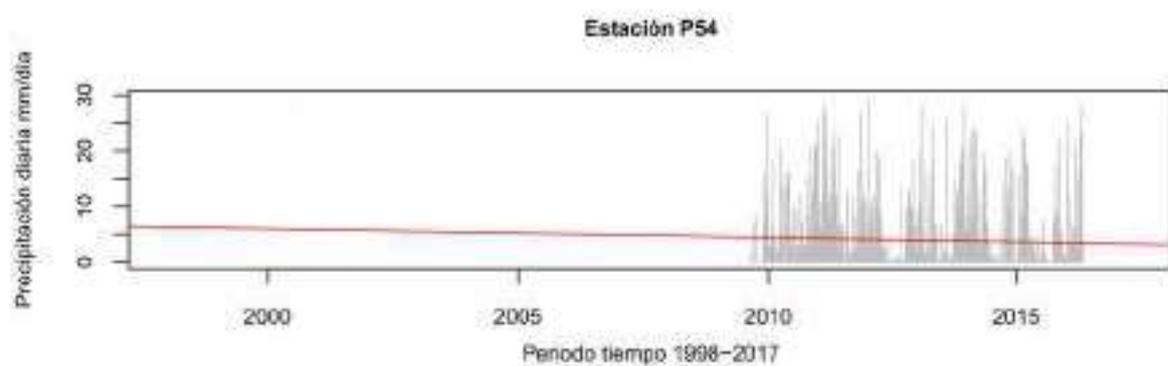
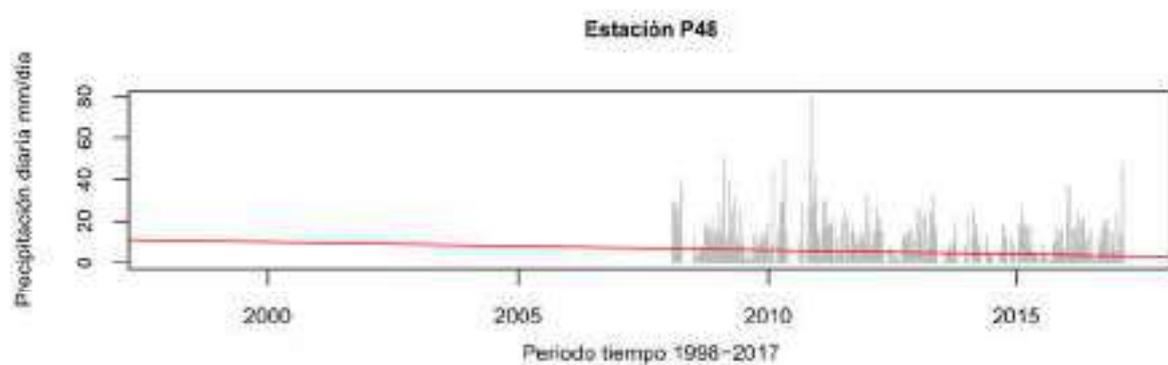


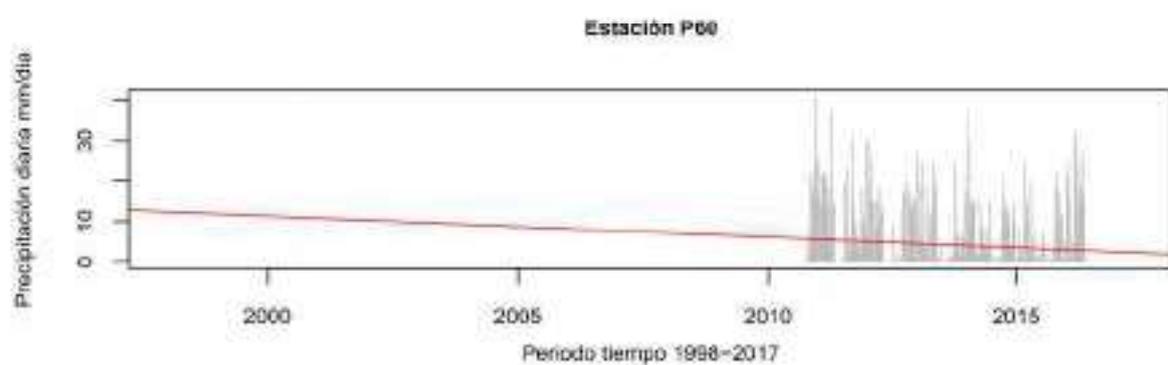
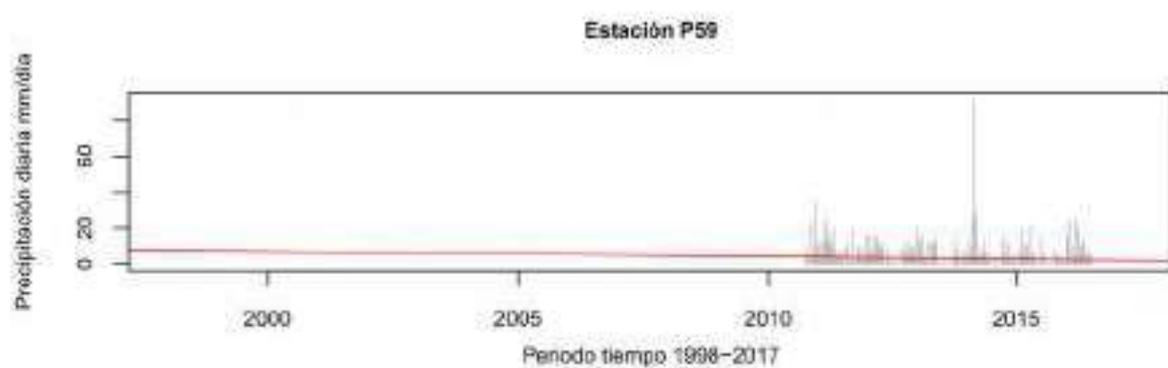
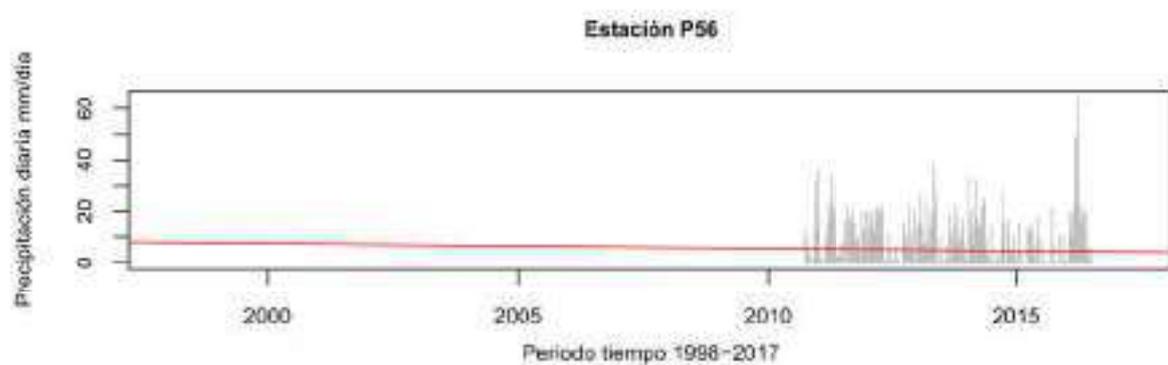


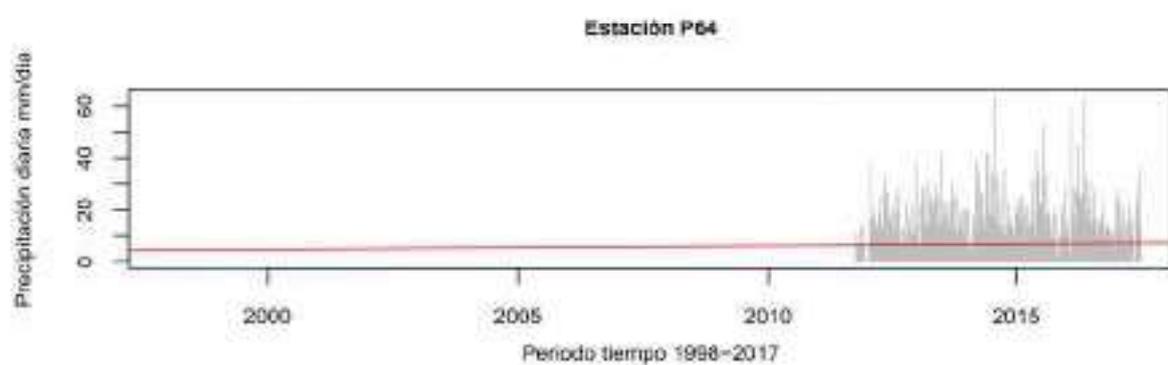
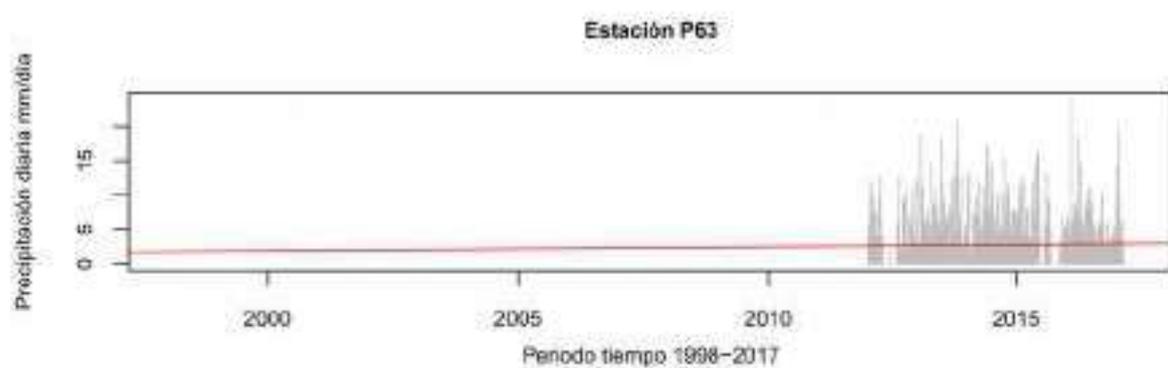
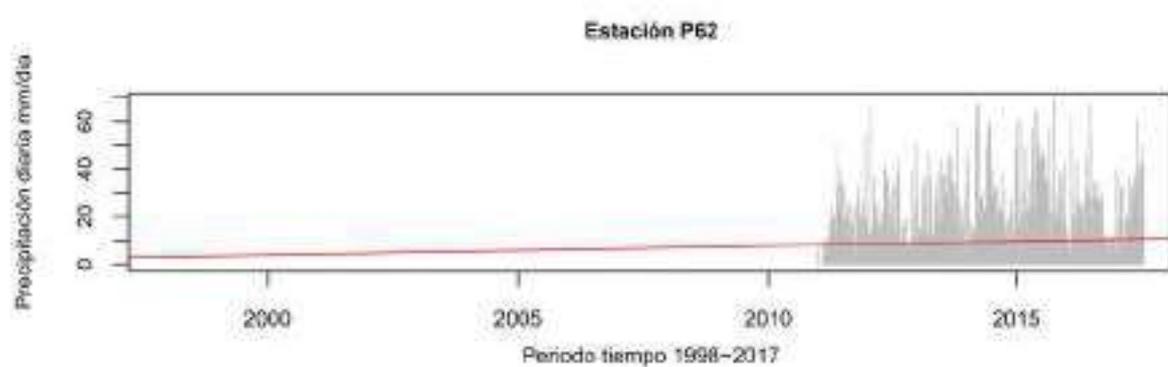
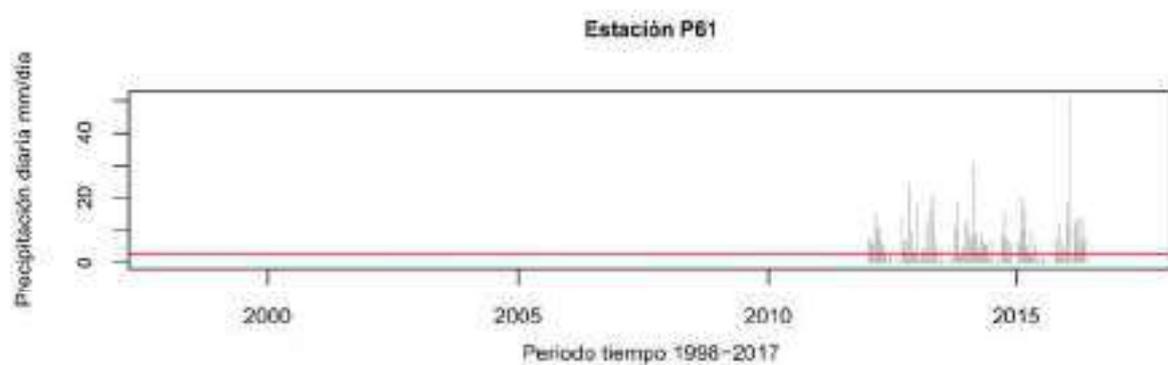


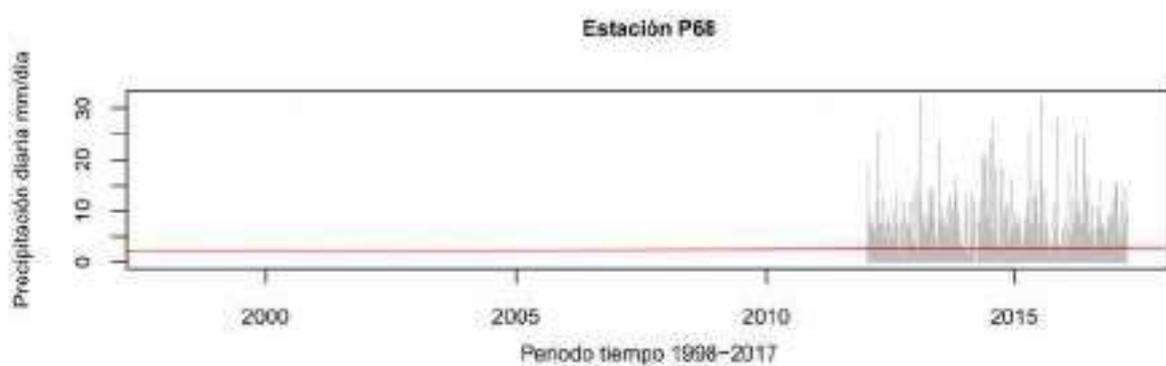
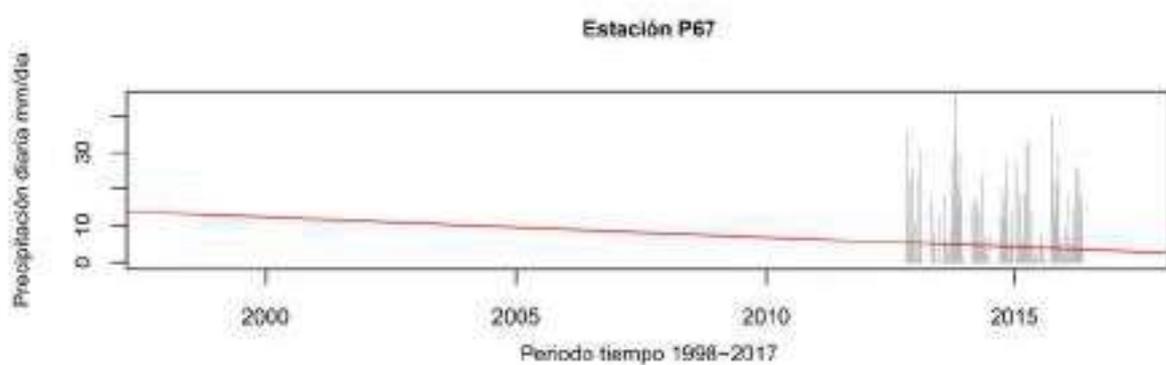
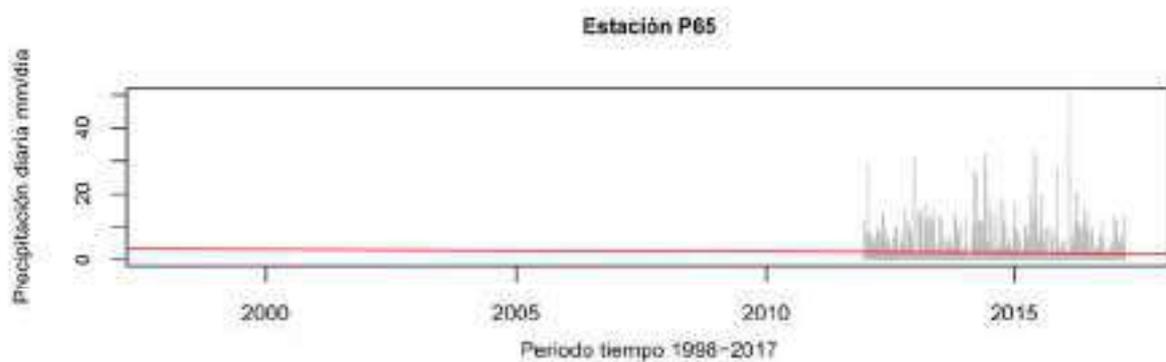


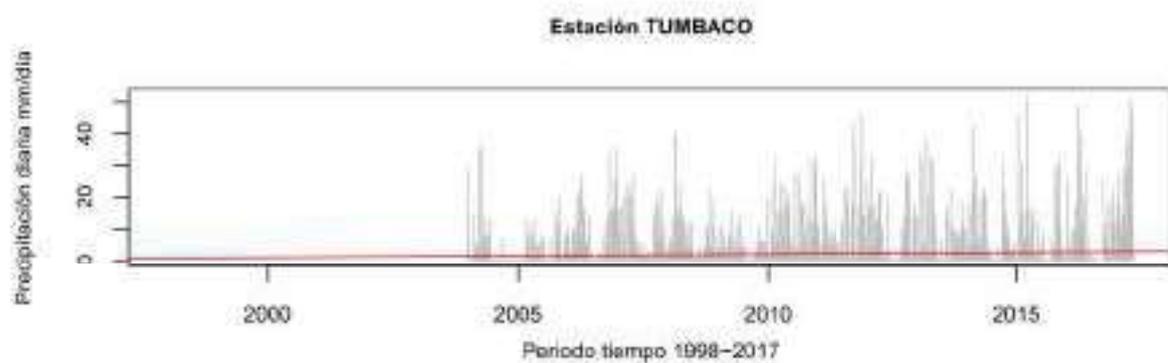






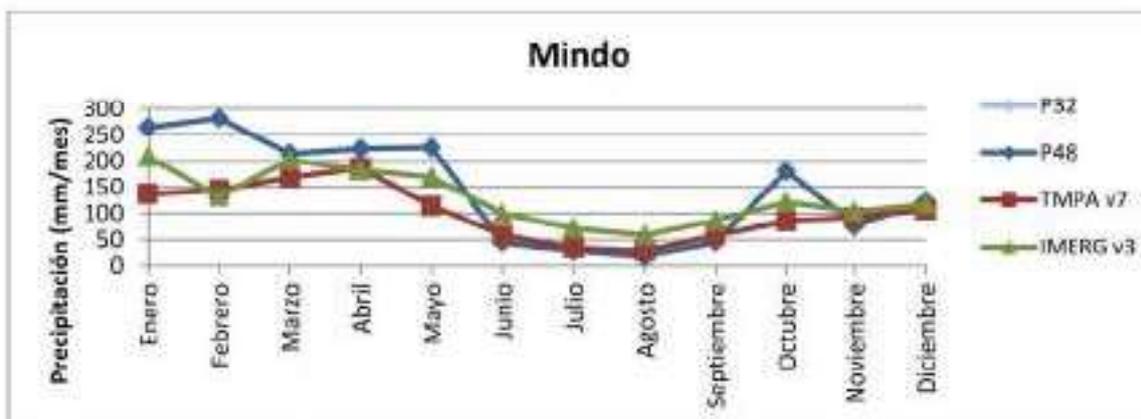
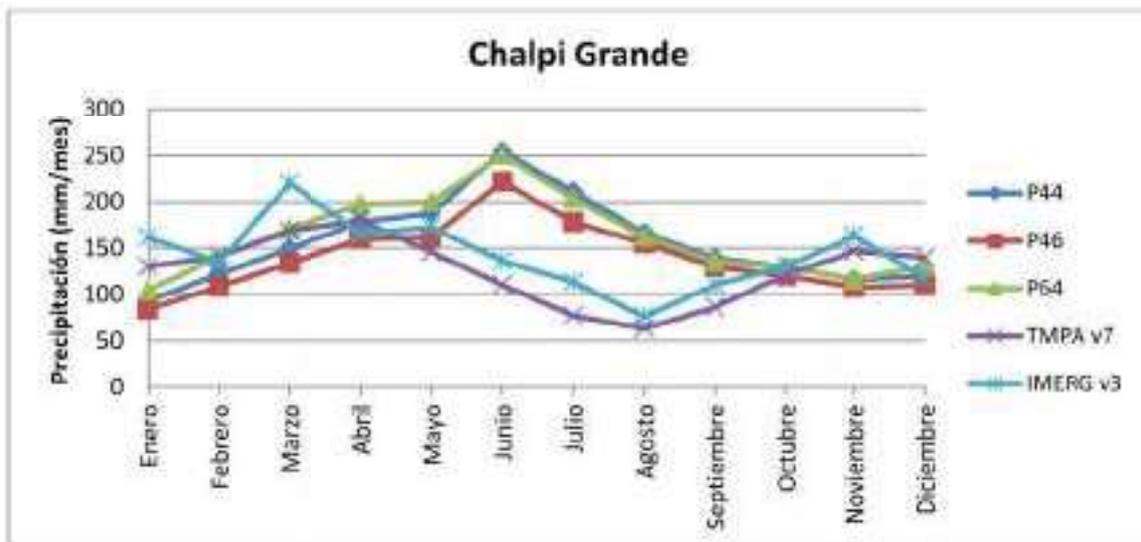
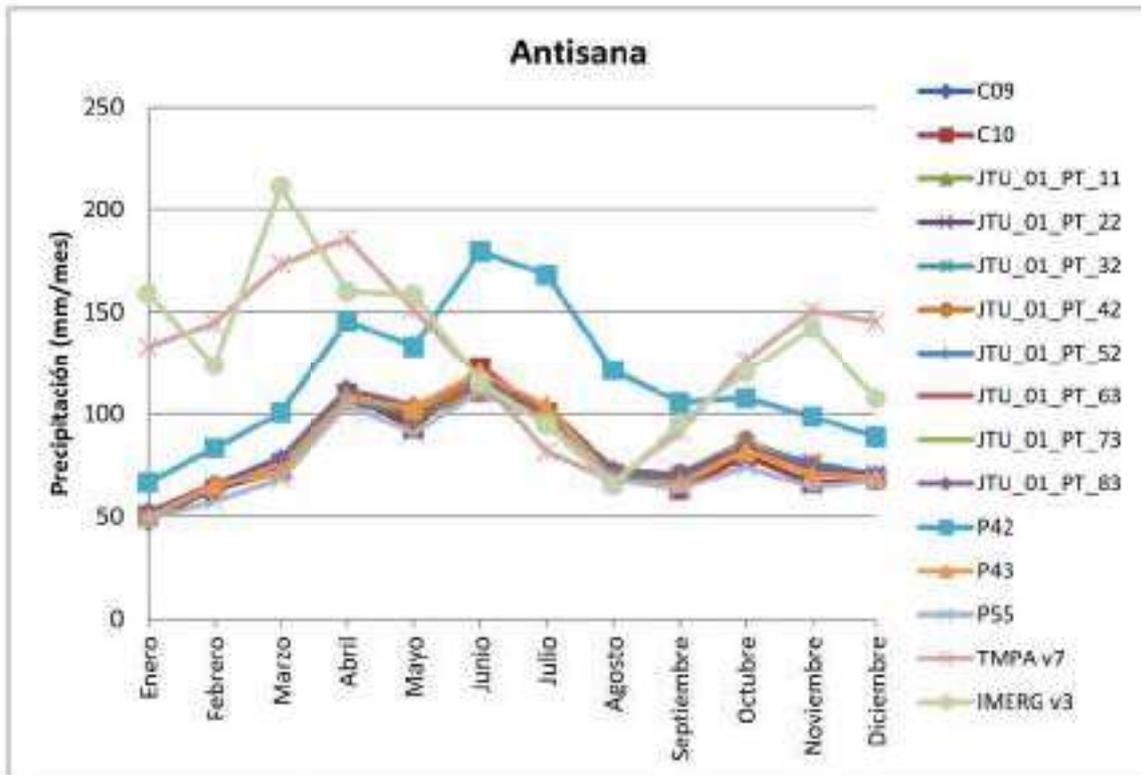




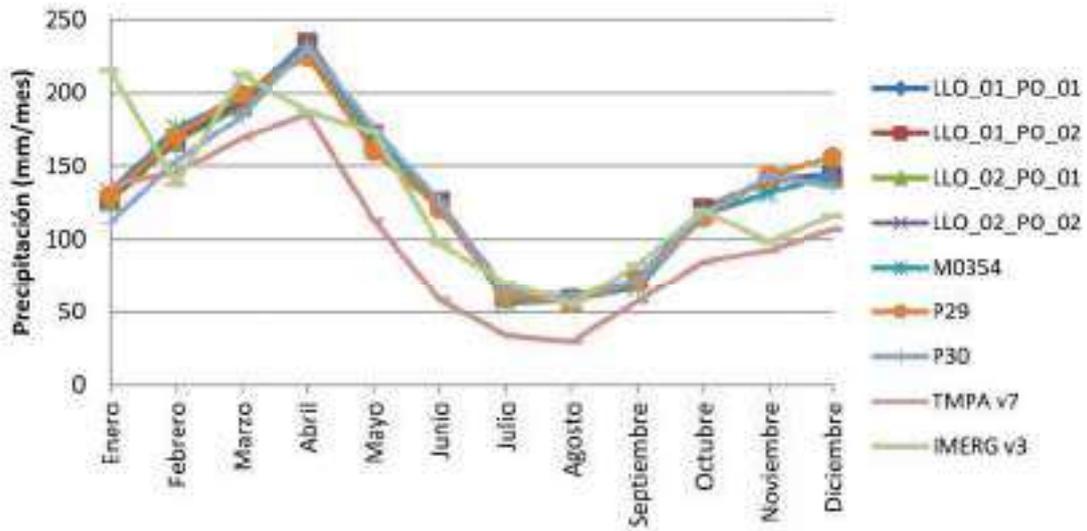


### **ANEXO 3**

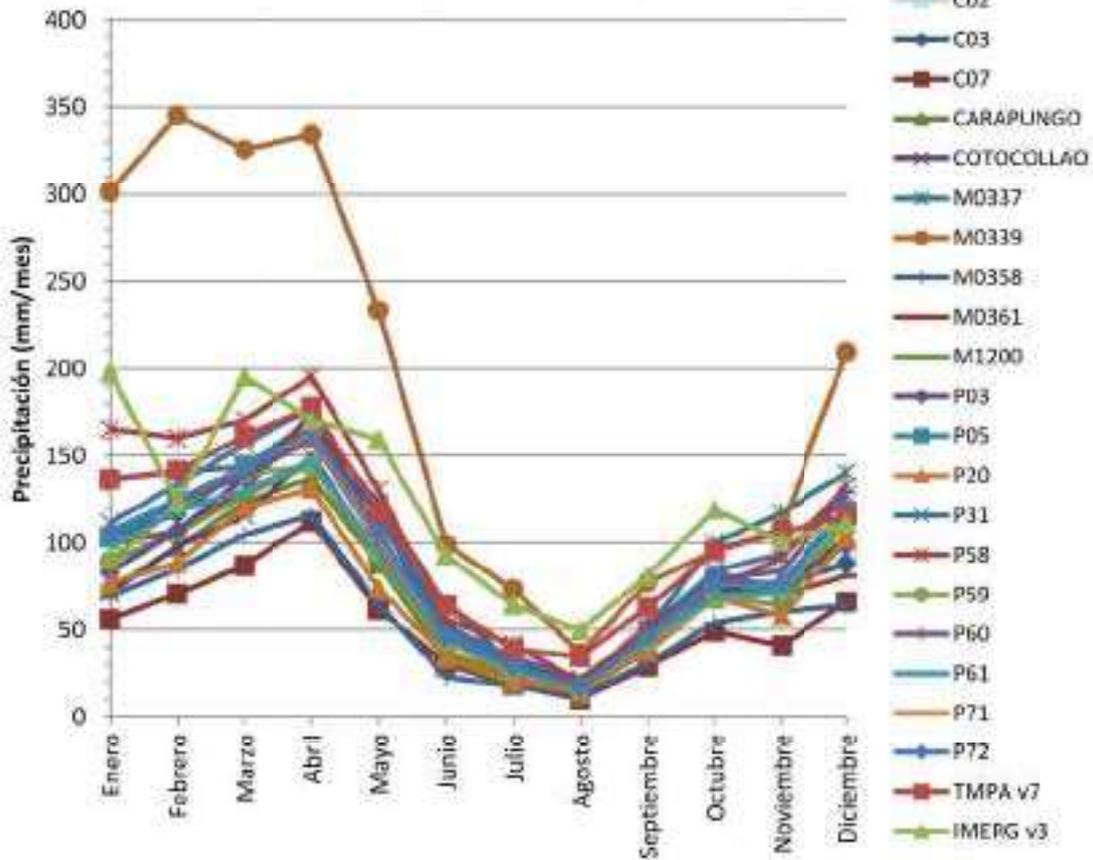
#### **Precipitación Mensual-Estaciones por Subcuenca**



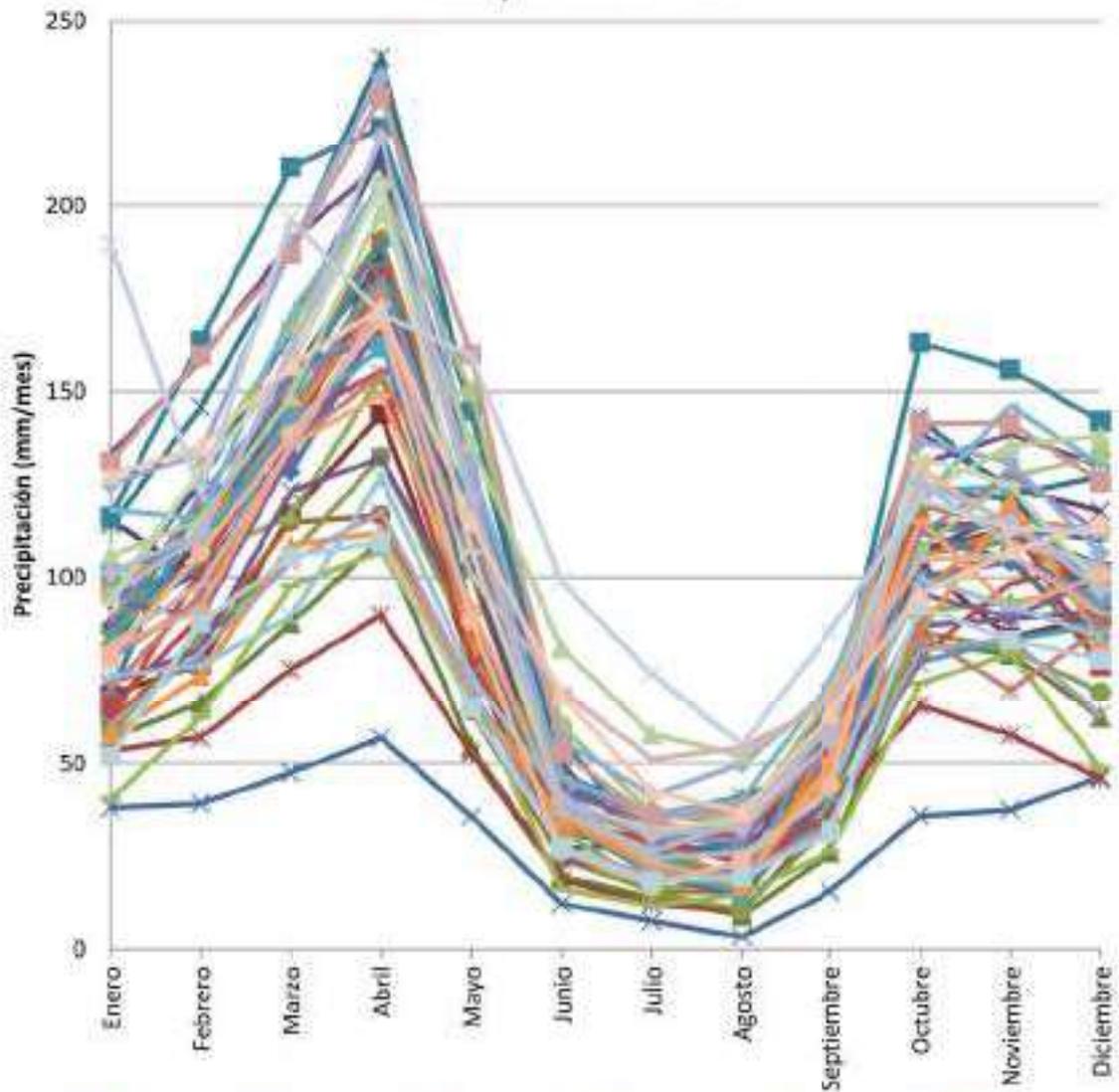
### Cinto



### Guayllabamba Medio

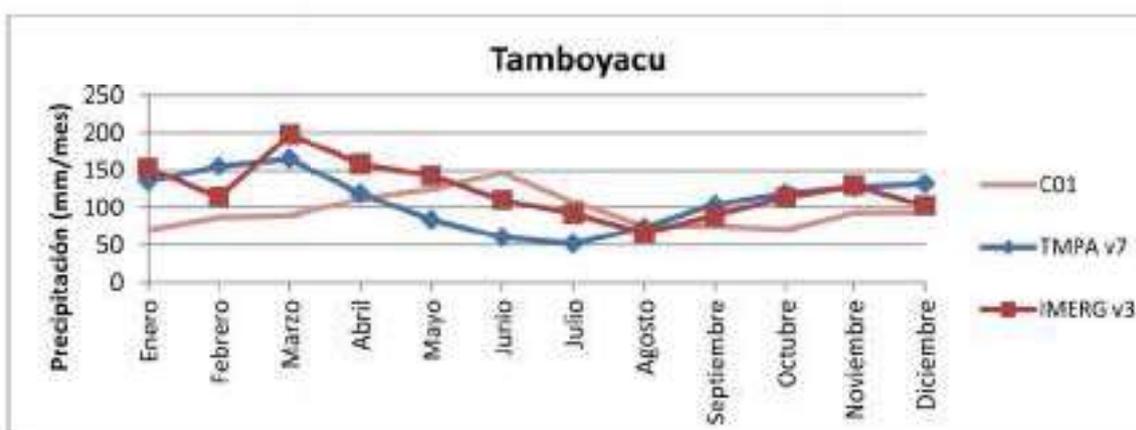
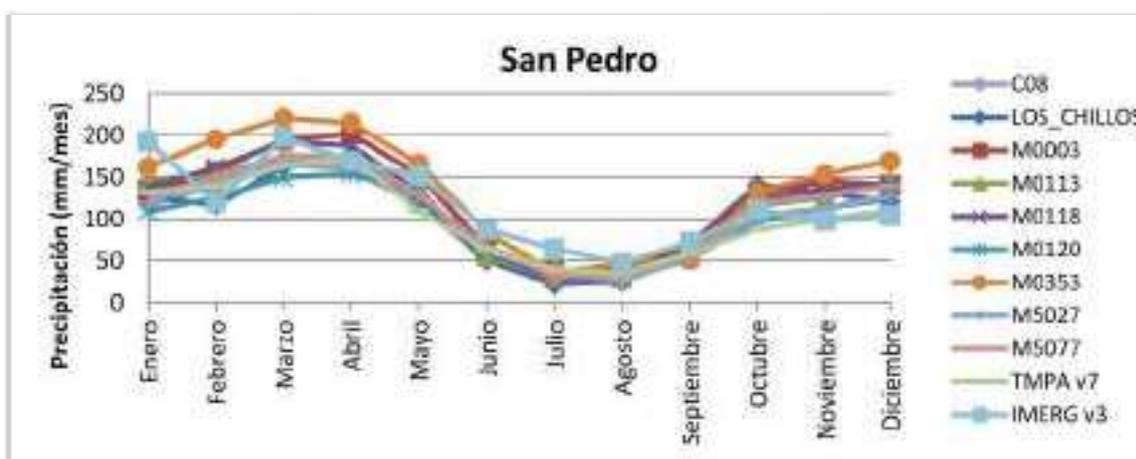
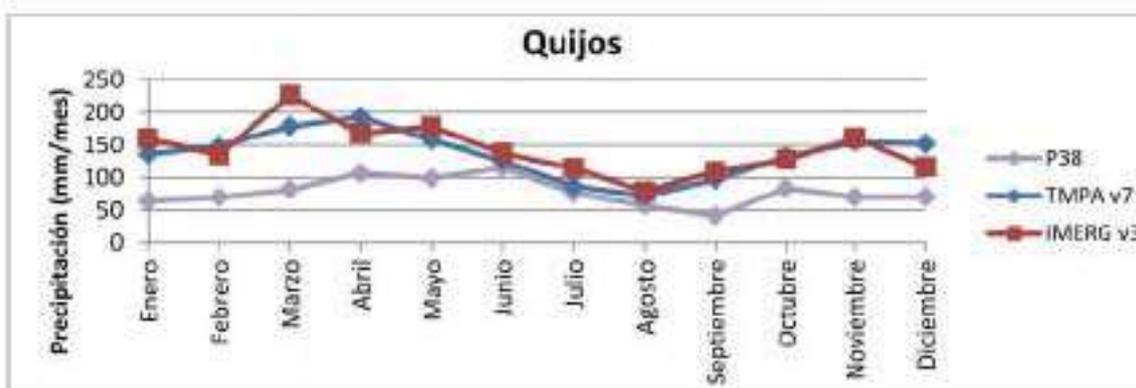
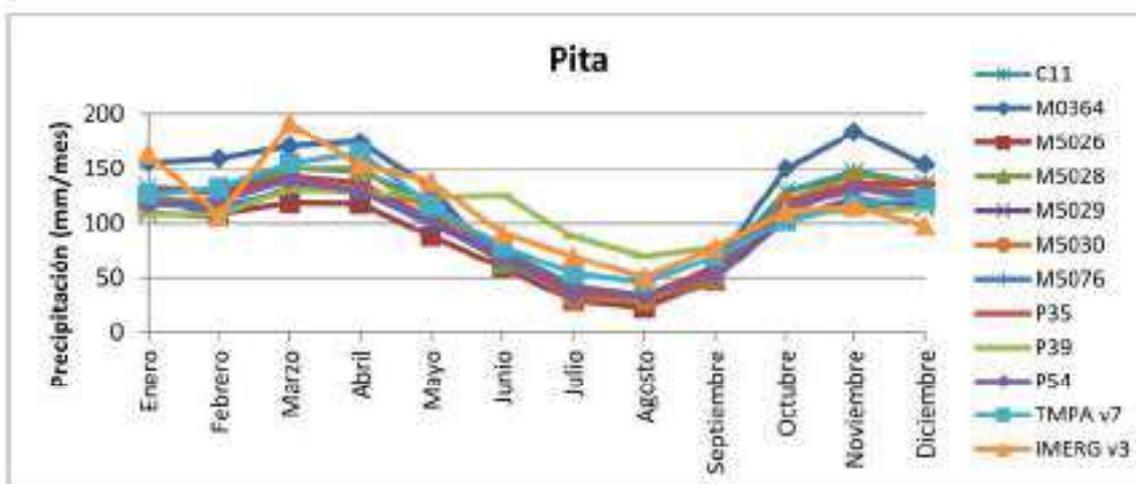


### Guayllabamba Alto



- |           |       |       |       |          |         |
|-----------|-------|-------|-------|----------|---------|
| BELISARIO | C04   | C05   | C06   | EL_CAMAL | GUAMANI |
| M0002     | M0010 | M0024 | M0114 | M0335    | M0341   |
| M0343     | M0345 | M0346 | M0357 | M5031    | M5074   |
| M5075     | M5078 | P08   | P09   | F10      | P11     |
| P12       | P13   | P14   | P15   | F17      | P19     |
| P21       | P22   | P23   | P24   | F25      | P26     |
| P27       | P28   | P33   | P41   | F45      | P52     |
| P56       | P63   | P67   | P70   | TUMBACO  | P77     |
| IMERG v3  |       |       |       |          |         |





## **ANEXO 4**

**Manual de descarga Mirador**

1. Ingresar por el navegador a la dirección: <http://mirador.gsfc.nasa.gov>
2. En **Keyword** escribir el producto satelital deseado: valores diarios (TRMM daily), valores mensuales (TRMM monthly), valores mensuales (IMERv3), etc. Indicar la fecha de búsqueda: desde (**Time Span**) y hasta (**To**) cuando se desea la información. Seleccionar con el cuadrado  la zona del mapa que se desea y las coordenadas se cargan automáticamente en **Location**, o en su defecto ingresar directamente las coordenadas.  
**NOTA:** anotar las coordenadas, éstas servirán más adelante para procesar la información en el script de R. (-79, -1,-77.5, 0.5).



3. Presionar **Search GES-DISC** se dirige a la siguiente página:



4. Escoger la tercera opción (Product V7) que corresponde a nivel mensual, que es la que interesa.

5. Presionar el botón **Add Selected Files To Cart**, que se encuentra al final de la página, se abre la siguiente página:



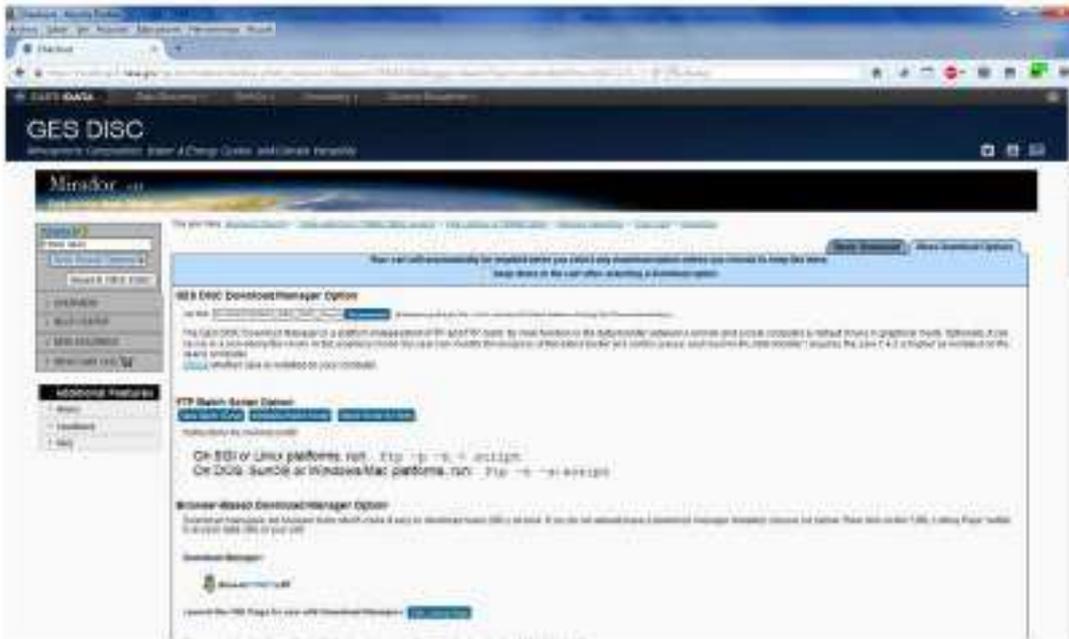
6. Presionar **Continue to Cart**, se abre la siguiente página



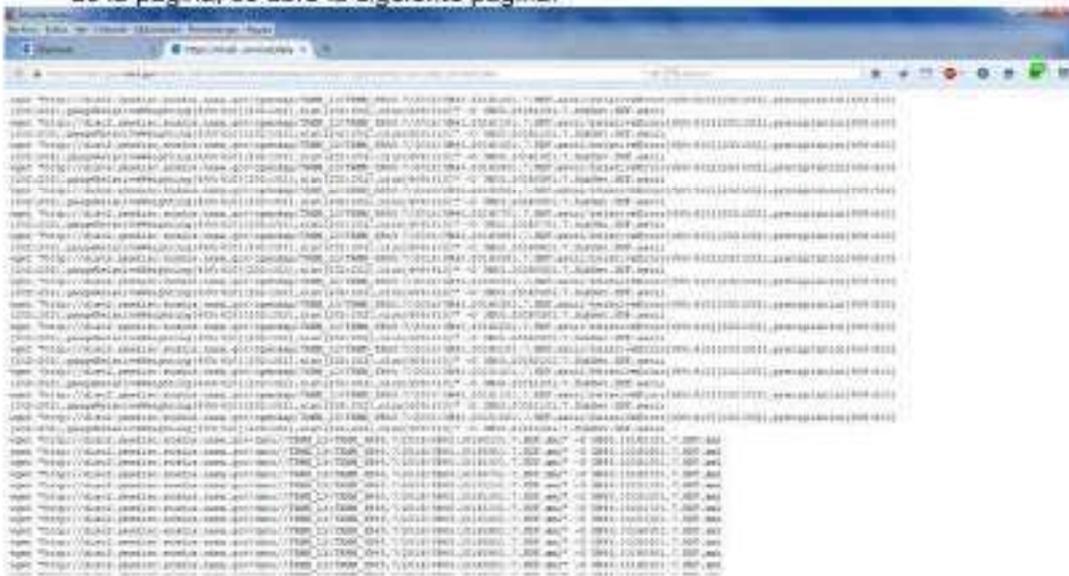
7. Con el botón **Delete** eliminar la primera opción que sale por defecto, y dejar solo la que se necesita. Presionar el botón **Checkout**, se abre la siguiente página:



8. Presionar al final de la página **More Options**, se abre la siguiente página:



9. Presionar **Windows script for use with wget** **URL List, Serviced Data only**, et botón al final de la página, se abre la siguiente página:



10. Para poder leer esta información, que viene en formato netCDF, descargar WGET desde: <https://eternallybored.org/misc/wget/>



11. Guardar la descarga de WGET en el disco (C:), crear una carpeta con el nombre WGET.



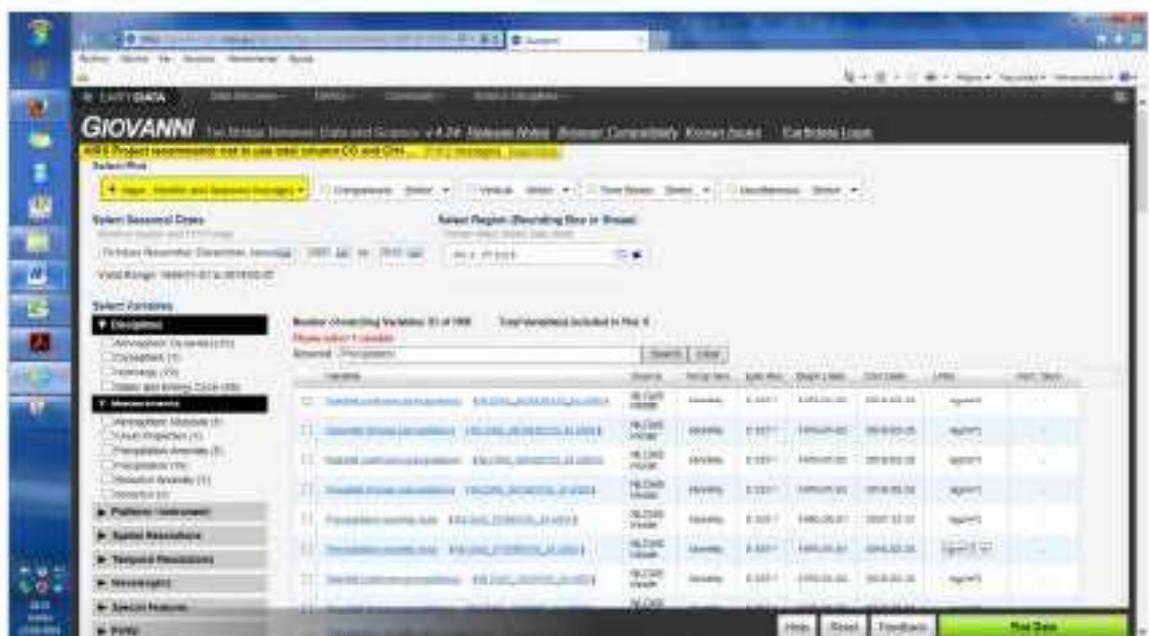
## **ANEXO 5**

**Manual de descarga Giovanni**

- Ingresar por el navegador a la dirección: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>



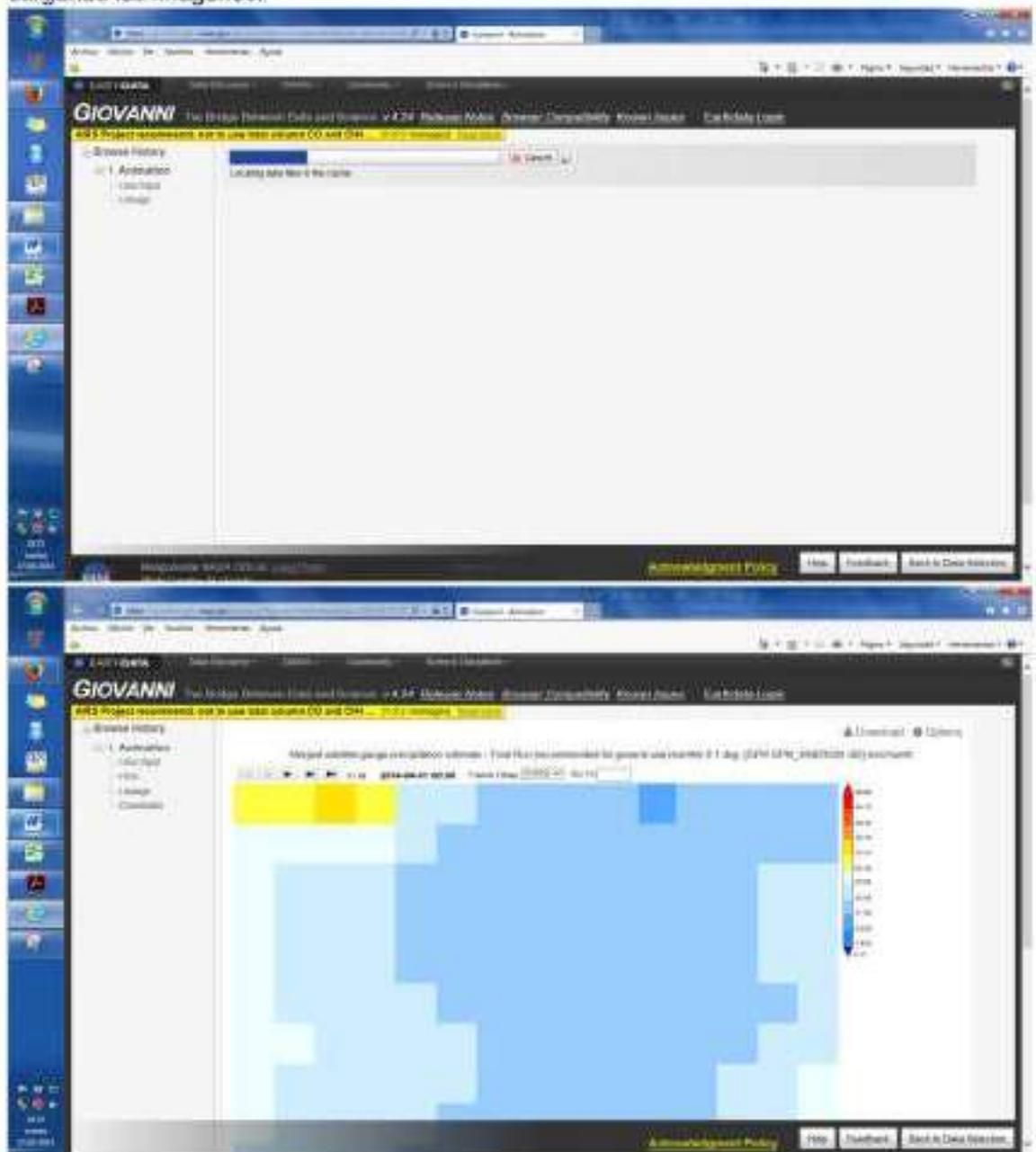
- En **Keyword** escribir el producto satelital deseado: valores diarios (TRMM daily), valores mensuales (TRMM monthly), valores mensuales (IMERv3), etc. Indicar la fecha de búsqueda: Select Date Range desde y hasta (**To**) cuando se desea la información. En Select Region: con el botón , se visualiza el mapa del mundo donde se puede seleccionar con el cuadrado  la zona del mapa que se desea y las coordenadas se cargan automáticamente, o en su defecto ingresar directamente las coordenadas. **NOTA:** anotar las coordenadas, éstas servirán más adelante para procesar la información en el script de R. (-79, -1,-77.5, 0.5).



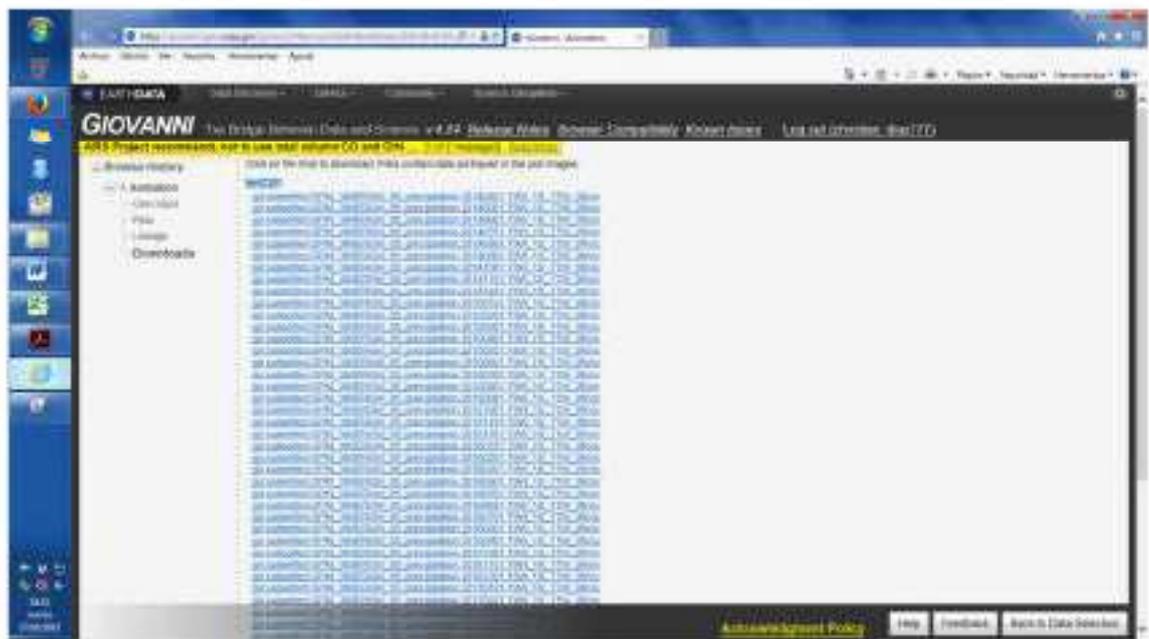
Se puede indicar que tipo de pre procesamiento se requiere: como animaciones, datos acumulados, estacionarios, animaciones, etc.



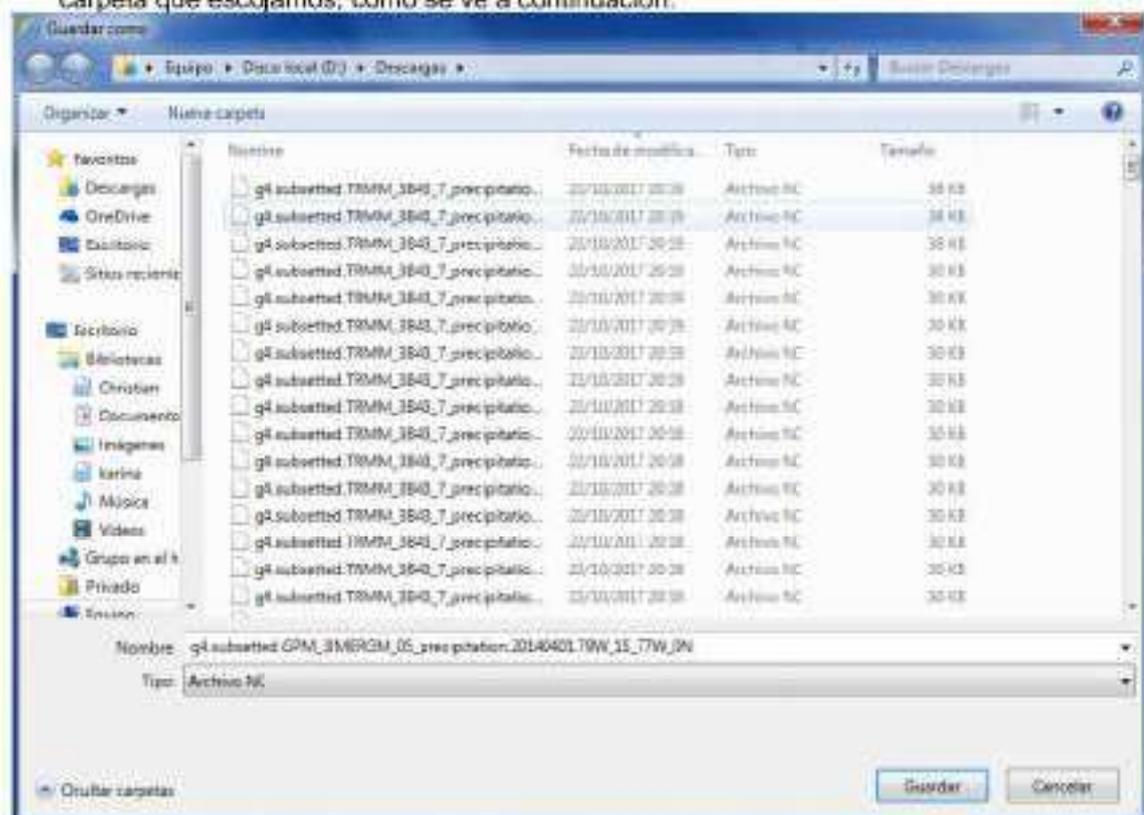
3. Se selecciona el producto deseado (ya sea de la misión TRMM o GPM) y se presiona el botón **Plot Data**. Se abre la siguiente página donde se están cargando las imágenes.



4. Con el botón  **Download** , se puede descargar en formato .png o como .zip,
5. En el botón  se puede visualizar todas las imágenes y seleccionarlas para descargarlas en conjunto en el formato NetCDF, que nos interesa.



6. Se iniciará la descarga, todos los archivos descargados se guardarán en la misma carpeta que escogimos, como se ve a continuación:



## **ANEXO 6**

**Códigos en R para procesar la información del producto TMPA v7  
e IMERG v3**

**CÓDIGO 6.1:** Algoritmo para extraer información satelital del producto TRMM/TMPA 3B43 V7

```

1 #Descargar e instalar los paquetes necesarios
2 install.packages("rgdal")
3 install.packages("raster")
4 install.packages("sp")
5 install.packages("rgeos")
6 install.packages("ncdf")
7 library(rgdal)
8 library(raster)
9 library(sp)
10 library(rgeos)
11 library(ncdf4)
12 ## Leer las coordenadas geográficas de las estaciones
13 estaciones <- read.delim("Inf_ESPACIAL_1.csv", header=TRUE, dec=".", sep=";")
14
15 ## Convertir el archivo de texto a variable geoespacial de coordenadas
16 coordinates(estaciones) <- "X+Y"
17 ## Proyección de las coordenadas
18 proj4string(estaciones) <- CRS("+proj=utm,+zone=17,+south,+ellps=WGS84+datum=WGS84,+
  units=m,+no_defs")
19 estaciones<-spTransform(estaciones, CRS("+proj=longlat,+datum=WGS84"))
20 ## Leer las imagenes TMPA
21 ## Guardar en una variable todos los nombres de los archivos .nc
22 files<- list.files(pattern="N.nc")
23 ## Bucle para almacenar en la variable accum las imagenes GPM IMERG para el area
24 for (i in 1:length(files)){
25   ## Leer imagen de un mes y convertirlo en archivo raster
26   imageraster<- raster(files[i], varname="TRMM_3B43_7.precipitation")
27   ## Asignación de Sistema de referencia
28   proj4string(imageraster) <- CRS("+proj=longlat,+datum=WGS84")
29   ## Leer el año y mes de la imagen
30   filesyear<- substr(files[i], 40, 47)
31   ## Convertir el archivo en una variable de tipo SpatialGrid Data Frame
32   imagesp<- as(imageraster, 'SpatialGridDataFrame')
33   ## Extraer en la variable names el año y mes de la imagen
34   names(imagesp) <- filesyear
35   ## Acumular los mapas de todos los meses en la variable accum
36   if (i == 1) { accum<- imagesp}
37   if (i!= 1) { accum<- cbind(accum,imagesp)}
38   ## Interpolar las estaciones con la imagen para obtener las estimaciones de
39   ##precipitación en cada una
40   over<- data.frame(extract(imageraster, estaciones))
41   ## Copiar en la variable over, el mes y año de la imagen
42   names(over) <- filesyear
43   ## Acumular en variable timeseries los datos mensuales para todas las estaciones
44   ifelse (i==1, timeseries<- data.frame(t(over)), timeseries<- rbind(timeseries,
  data.frame(t(over))))
45 }
46 ## Guardar en la variable timeseries los años y meses de la serie de datos
47 timeseries$name<- rownames(timeseries)
48 ## Exportar la serie de datos de precipitación estimada por el satélite en las
49 ##estaciones
50 write.table(timeseries,"TTMPA_131est.txt", sep="\t", row.names = FALSE, col.names=TRUE)
51
52 namestaciones<-estaciones$COORD
53 colnames(timeseries)<-namestaciones
54 timeseries <- rownames(timeseries)

```

**CÓDIGO 6.2:** Para calcular las Métricas Estadísticas e Índices de Detección entre información pluviométrica y productos satelitales.

```

1  ## Instalación y carga de los paquetes necesarios
2  install.packages("hydroGOF")
3  library(hydroGOF)
4  ## Lectura de las estimaciones de precipitación por los pluviómetros.
5  # revisar que concuerden las estaciones con las de los satélites.
6  pluv<-total_y7<-(read.zoo(file = "Promedio_mensual_RLMul.csv", sep = ";", dec = ".",
7  header = TRUE ))
8  ## Lectura de las estimaciones de precipitación por el satélite, en este caso TMPA V7
9  # pero de igual forma se hace para IMERG V3
10 tmpa7<-(read.zoo(file = "Promedio_mensual_TMPA.csv", sep = ";", dec = ".", header =
11 TRUE ))
12 #setwd("C:/Users/Privado/Contacts/TE515/Revision_Script_naty/REPAS_bases_y_scripts/
13 #Estimaciones de Satelite para cada estación/Est Prec Satelite TMPA/Correccion.
14 #distintos_rellenos/Regresión Lineal")
15 ## Guardar en la variable no el número de columnas (= número de pluviómetros)
16 ne<-ncol(pluv)
17 a<-gof(tmpa7, pluv)
18 gof_resultado<-a
19 write.table(gof_resultado, "Estadísticas_IMERG_RLMúltiple.csv", sep = ";", dec = ".",
20 row.names = TRUE, col.names=TRUE)
21 #Índices estadísticos por estación
22 RMSE <- gof_resultado["RMSE"] # error medio cuadrático
23 r<- gof_resultado["r"] # correlación de pearson
24 PBIAS<- gof_resultado["PBIAS_%"] #Porcentaje de bias
25 i_agg<- gof_resultado["d"] #índice de acuerdo
26 ME<- gof_resultado["Me"] #error medio
27 MAE<- gof_resultado["Mae"] #error absoluto
28 #Índices estadísticos globales
29 mRMSE <- mean(RMSE)
30 mr<- mean(r)
31 mPBIAS<- mean(PBIAS)
32 mi_agg<- mean(i_agg)
33 mME<- mean(ME)
34 mMAE<- mean(MAE)
35 # Índices de detección
36 ## Determinar los límites de precipitación (mm) para calcular los índices.
37 { Umbral }
38 thresholds=c{5,10,20,50,100,200,300} # reducir porque valor máximo es de 270; cambiar
39 # los límites
40 ## Guardar en una variable el número de límites
41 nt<-length(thresholds)
42 ## Asignar ceros a las variables para guardar los índices
43 ResFBI<-matrix(rep(NA, ne*nt), ncol=ne)
44 ResFAR<-matrix(rep(NA, ne*nt), ncol=ne)
45 ResPOD<-matrix(rep(NA, ne*nt), ncol=ne)
46 ResETS<-matrix(rep(NA, ne*nt), ncol=ne)
47 #cálculo global para todas las estaciones y todos los meses
48 for (i in 1:ne) { #Bucle para cada pluviómetro
49   for (k in 1:nt) { #Bucle para cada umbral de precipitación
50     # Tablas de contingencia
51     a =ifelse(is.na(subset(data.frame(table(tmpa7[,i])>=thresholds[k] & pluv[,i])>=
52     thresholds[k])), Var1=TRUE, "Freq")[1,], 0, subset(data.frame(table(tmpa7[,i]
53     )>=thresholds[k] & pluv[,i])>=thresholds[k]), Var1=TRUE, "Freq")[1,]) #TRUE a
54     verdadero ambos
55     d=ifelse(is.na(subset(data.frame(table(tmpa7[,i]<thresholds[k] & pluv[,i]<thresholds[k]
56     )), Var1=TRUE, "Freq")[1,]), 0, subset(data.frame(table(tmpa7[,i]<thresholds[k] &
57     pluv[,i]<thresholds[k])), Var1=TRUE, "Freq")[1,]) #TRUE d falso ambos
58     b= ifelse(is.na(subset(data.frame(table(tmpa7[,i])>=thresholds[k] & pluv[,i]<
59     thresholds[k])), Var1=TRUE, "Freq")[1,]), 0, subset(data.frame(table(tmpa7[,i]
60     )>=thresholds[k] & pluv[,i]<thresholds[k]), Var1=TRUE, "Freq")[1,]) #TRUE b
61     falso positivo
62     c=ifelse(is.na(subset(data.frame(table(tmpa7[,i]<thresholds[k] & pluv[,i])>=thresholds[k]
63     )), Var1=TRUE, "Freq")[1,]), 0, subset(data.frame(table(tmpa7[,i]<thresholds[k] &
64     pluv[,i])>=thresholds[k]), Var1=TRUE, "Freq")[1,]) #TRUE c Falso negativo
65     # Cálculo de los índices de detección
66     POD= a/(a+c)
67     HE= ((a+c)*(a+b))/(a+b+c+d)
68     ETS=(a-HE)/(a+b+c-HE)
69   }
70 }

```

```
53 FAR= b/ (a+b)
54 FBI=(a+b)/(a+c)
55 # Almacenar resultados de cada pluviometro
56 ResFBI[k,l]<-FBI
57 ResPOD[k,l]<-POD
58 ResFAR[k,l]<-FAR
59 ResETS[k,l]<-ETS)
60 ## Exportar los resultados
61 write.table(PBIAS,"Bias_RLTPMA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
62 write.table(RMSE,"RMSE_RLTPMA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
63 write.table(r,"Pearson_RLTPMA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
64 write.table(i_agg,"acuerdo_RLTPMA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
65 write.table(ResFBI,"FBI_RLMultiple_TMPA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
66 write.table(ResFAR,"FAR_RLMultiple_TMPA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
67 write.table(ResPOD,"POD_RLMultiple_TMPA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
68 write.table(ResETS,"ETS_RLMultiple_TMPA.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
```

**CÓDIGO 6.3:** Para procesar información de los productos satelitales y datos observados, empleando "Rainmerging" (incluye Validación Cruzada - Cross-validation).

```

1 library(Rainmerging)
2 load("sat.rda") # corresponde al producto satelital TMPA v7 o IMERG v3
3 load("gauge.rda") # contiene la información pluviométrica (Base Rellenada)
4 # define interpolation grid
5 coords <- sat[[2]] # this is default case where
6 # interpolation grid = satellite grid, otherwise define coords.
7 # regrid satellite data onto interpolation grids
8 sat <- NN.interp(sat,coords) #uncomment if interp.grid != satellite.grid
9 # colocate gauge with pixels and take average when #gauges/pixel > 1.
10 gauge <- colocate.gauge(gauge,coords)
11 #####
12 # perform merging
13 #####
14 # Mean-field (i.e spatial) bias correction
15 MBC.out <- MBC(sat,gauge)
16 # Double kernel smoothing
17 DS.out <- DS(sat,gauge)
18 # Ordinary Kriging
19 OK.out <- OK(coords,gauge)
20 # Universal Kriging/Kriging with External Drift
21 KED.out <- KED(sat,gauge)
22 # Bayesian Combination
23 BC.out <- BC(sat,gauge)
24 # save results
25 results <- list(sat[[1:ts]],MBC.out,DS.out,OK.out,KED.out,BC.out)
26 results <- list(sat[[1]],MBC.out,DS.out,OK.out,KED.out,BC.out)
27 names(results) <- list("SAT","MBC","DS","OK","KED","BC")
28 #####
29 # visualise output
30 #####
31 # calculate and plot mean
32 #####
33 # calculate and plot correccions mensual
34 total.correcciones<-c('Enero','Febrero','Marzo','Abril','Mayo','Junio','Julio','Agosto',
35   'Septiembre','Octubre','Noviembre','Diciembre')
36 #indice<-seq.POSIXt(as.POSIXct('2014-04-01 00:00:00'),as.POSIXct('2016-12-01
37   00:00:00'),by='month')
38 total.correcciones<-(2015:2016)
39 for (i in 1:12) {
40   print(i)
41   resultssw <- list(sat[[1]][i],MBC.out[i],DS.out[i],OK.out[i],KED.out[i],
42     BC.out[i])
43   names(resultssw) <- list("SAT","MBC","DS","OK","KED","BC") #OK corresponde a las
44     observaciones satelitales.
45 }
46 fun <- function(ts) { return(apply(ts, 2, mean))}
47 map1 <- sapply(resultssw, fun)
48 map1 <- data.frame(map1)
49 coordinates(map1) <- coordinates(sat[[2]])
50 map1 <- as(map1,"SpatialPixelsDataFrame")
51 pdf(paste('plot.imerg-promedio-media_',total.correcciones[i],'.pdf',sep=''), width=8,
52   height=6)
53 print(splot(map1, at = seq(0,400,25),main=paste('IMERG_',total.correcciones[i],sep =
54   ''))+ #layer(sp.points(estaciones,cex=12,pch=18,col='black'))+layer(sp.
55   polygons(cuenca_guay,col=1,fill="transparent"))}
56 dev.off()
57 #####
58 # run cross-validation
59 #####
60 # Mean-field (i.e spatial) bias correction
61 MBC.cv <- MBC(sat,gauge,cross.val=TRUE)
62 # Double kernel smoothing
63 DS.cv <- DS(sat,gauge,cross.val=TRUE)
64 # Ordinary Kriging
65 OK.cv <- OK(coords,gauge,cross.val=TRUE)
66 # Universal Kriging/Kriging with External Drift
67 KED.cv <- KED(sat,gauge,cross.val=TRUE)
68 # Bayesian Combination
69 BC.cv <- BC(sat,gauge,cross.val=TRUE)

```

```

63 # Satellite product
64 loc <- numeric()
65 for (i in 1:length(gauge[[2]][[.]])) loc[i] <- which.min(spDists(sat[[2]], gauge[[2]][[i.]]
, longlat=TRUE))
66 SAT.cv <- sat[[1]][[loc]]
67 # save results
68 results.CV <- list(SAT.cv, MBC.cv, DS.cv, OK.cv, KED.cv, BC.cv)
69 names(results.CV) <- list("SAT", "MBC", "DS", "OK", "KED", "BC")
70 # calculate and compare scores
71 scores <- crossval_score(results.CV, gauge)
72 map <- scores[["me"]]
73 coordinates(map) <- coordinates(gauge[[2]])
74 pdf("Me_scores_anualMedia.pdf", width=6, height=7)
75 print(splot(map, cuts=c(-100,-25,-10,-5,5,10,25,100), main="ME.lmerg"))
76 dev.off()
77 #####
78 map1 <- scores[["r"]]
79 coordinates(map1) <- coordinates(gauge[[2]])
80 pdf("R_scores_anualMedia.pdf", width=6, height=7)
81 print(splot(map1, cuts=c(0,0.1,0.2,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1), main="R.correlación.l
lmerg"))
82 dev.off()
83 #####
84 map2 <- scores[["mae"]]
85 coordinates(map2) <- coordinates(gauge[[2]])
86 pdf("MAE_scores_anualMedia.pdf", width=6, height=7)
87 print(splot(map2, cuts=c(0,25,50,75,100,125,150,175,200), main="MAE.lmerg"))
88 dev.off()
89 #####
90 map3 <- scores[["rmse"]]
91 coordinates(map3) <- coordinates(gauge[[2]])
92 pdf("RMSE_scores_anualMedia.pdf", width=6, height=7)
93 print(splot(map3, cuts=c(0,50,100,150,200,250,300,350), main="RMSE.lmerg"))
94 dev.off()

```

Repetir el proceso con cada producto satelital (TMPA v7 o IMERG v3) y con cada base rellena (Regresión Lineal Simple, Regresión Lineal simple con producto satelital, Regresión Lineal Múltiple, IDW, OK o Spline).

**CÓDIGO 6.4:** Para plotear las imágenes (Isometas de Precipitación Media Mensual Multianual) de los productos satelitales corregidos (TMPA v7 e IMERG v3) por los distintos métodos de corrección.

```

1 library(ggplot2)
2 library(rasterVis)
3 library(RColorBrewer)
4 library(rgdal)
5 library(raster)
6 library(gstat)
7 library(gridExtra)
8 load('tmpa.RData')#archivo con imgs corregidas
9 #load('MBC.tmpa.RData');load('DS.tmpa.RData');load('KED.tmpa.RData')
10 #load('BC.tmpa.RData')
11 estaciones<-read.csv(file = "Inf_espacial_1.csv", sep = ";", dec = ".", header = TRUE)
12 est_sp<-estaciones
13 # abrir shapefile de las estaciones
14 est_shp<-cbind(est_sp[,7:8], est_sp[,4])
15 est_shp<-data.frame(est_shp)
16 # extraer solo informacion x, y y codigo
17 est_sp<-est_shp
18 ##ESTACIONES
19 # abrir shapefile de las estaciones
20 est_shp<-readOGR(dsn='.', layer='EC_A.HOMO.2010')
21 # extraer solo informacion x, y y codigo
22 est_sp<-data.frame(est_shp@coords[,1:2], est_shp@data$id.Estació)
23 colnames(est_sp)<-c('x', 'y', 'codigo')
24 # transformar en SpatialPointsDataFrame
25 coordinates(est_sp) <- "x + y"
26 proj4string(est_sp)<-CRS("+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84")
27 proj4string(temp)<-CRS("+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84")
28 #abir shape cuenca
29 cuenca_guay<-readOGR(dsn='.', layer='subcuencas')
30 cuenca_guay<-spTransform(cuenca_guay, CRS("+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84"))
31 ras_guay<-raster(extent(cuenca_guay), res=0.005)
32 ras_guay<-rasterize(cuenca_guay, ras_guay, field=1)
33 total_stack<-stack()
34 for (i in 1:nrow(tmpaDS$mes)){
35   temp<-rasterFromXYZ(as.data.frame(imerg$sp))
36   temp[[i]]<-tmpaDS$mes[i,]
37   temp_resample<-resample(temp, ras_guay, method='bilinear') #ngb
38   temp_mask<-mask(temp_resample, ras_guay)
39   total_stack<-stack(total_stack, temp_mask)
40 #names(total_stack)<-paste0('Año_', 1998:2016)
41 #indice<-seq.POSIXt(as.POSIXct('1998-01-01 00:00:00'), as.POSIXct('2016-12-01
42   00:00:00'), by='month')
43 #names(total_stack)<-indice
44 names(total_stack)<-c('Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio', 'Julio', 'Agosto',
45   'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre', 'Diciembre')
46 #names(total_stack)<-paste0('Año_', 1998:2016)
47 rain<-colorRampPalette(brewer.pal(9, 'Blues'))
48 plot_anual<-print(levelplot(total_stack, margin=F, col.regions=rain,
49   at=seq(0,300,by=25), colorkey=list(space='bottom', labels=
50   list(cex=1.5)),
51   par.settings=list(layout.heights=list(xlab.key.padding=1),
52     scales=list(cex=1.5), main='Corrección_DS_', Método_de_
53     Relleno_Regresión_Simple_Imergv3_', xlab=list(label='
54     Longitude', cex=1.5), ylab=list(label='Latitude', cex
55     =1.5))+layer(sp.points(est_sp, cex=1, col='black'))))
56 layer(sp.polygons(cuenca_guay, lwd=2))
57 file='plot_mensual_RSImpleimergv3_imergv3_DS_.pdf'
58 pdf(file=file, width=15, height=22)
59 plot_anual
60 dev.off()

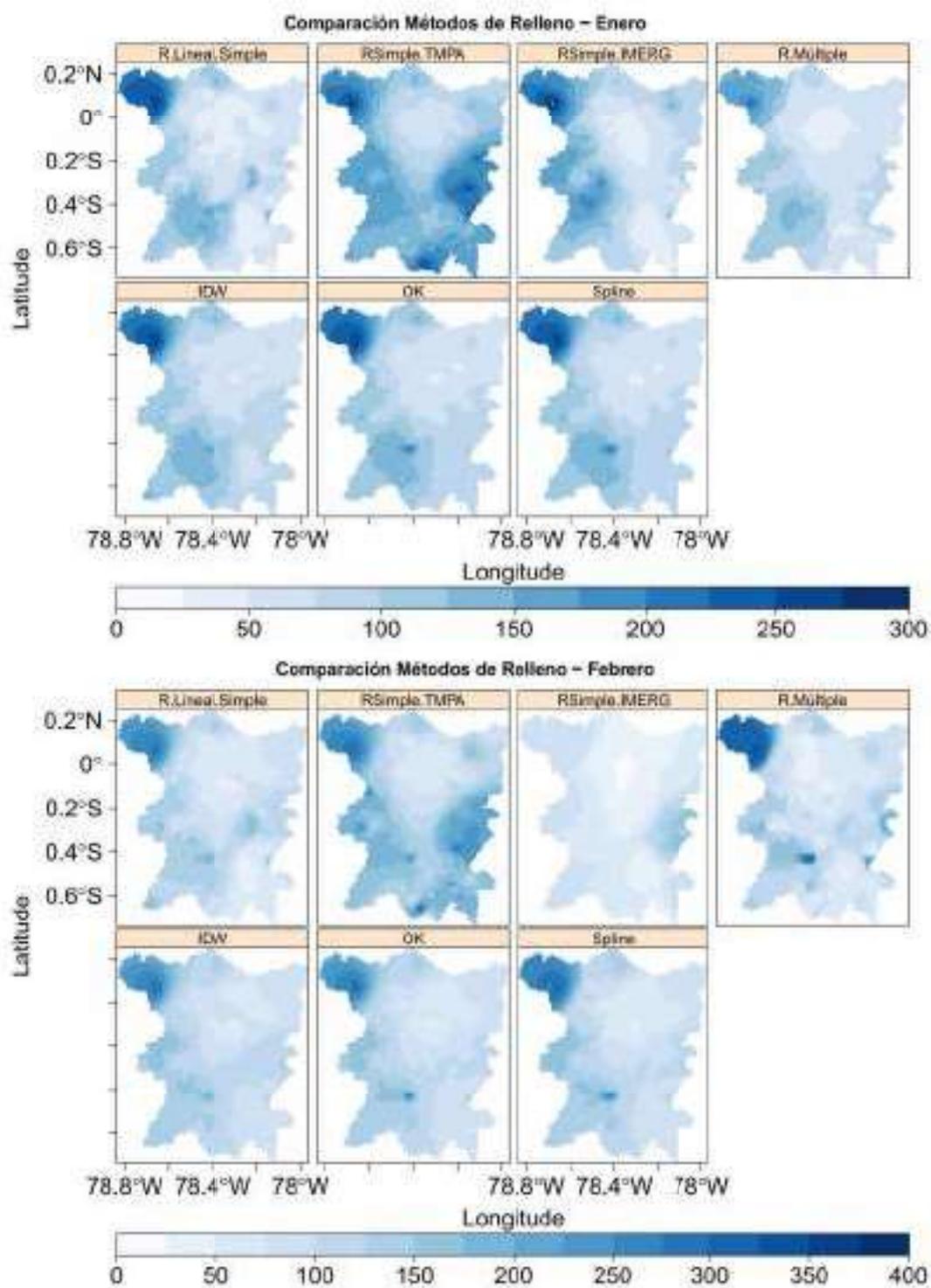
```

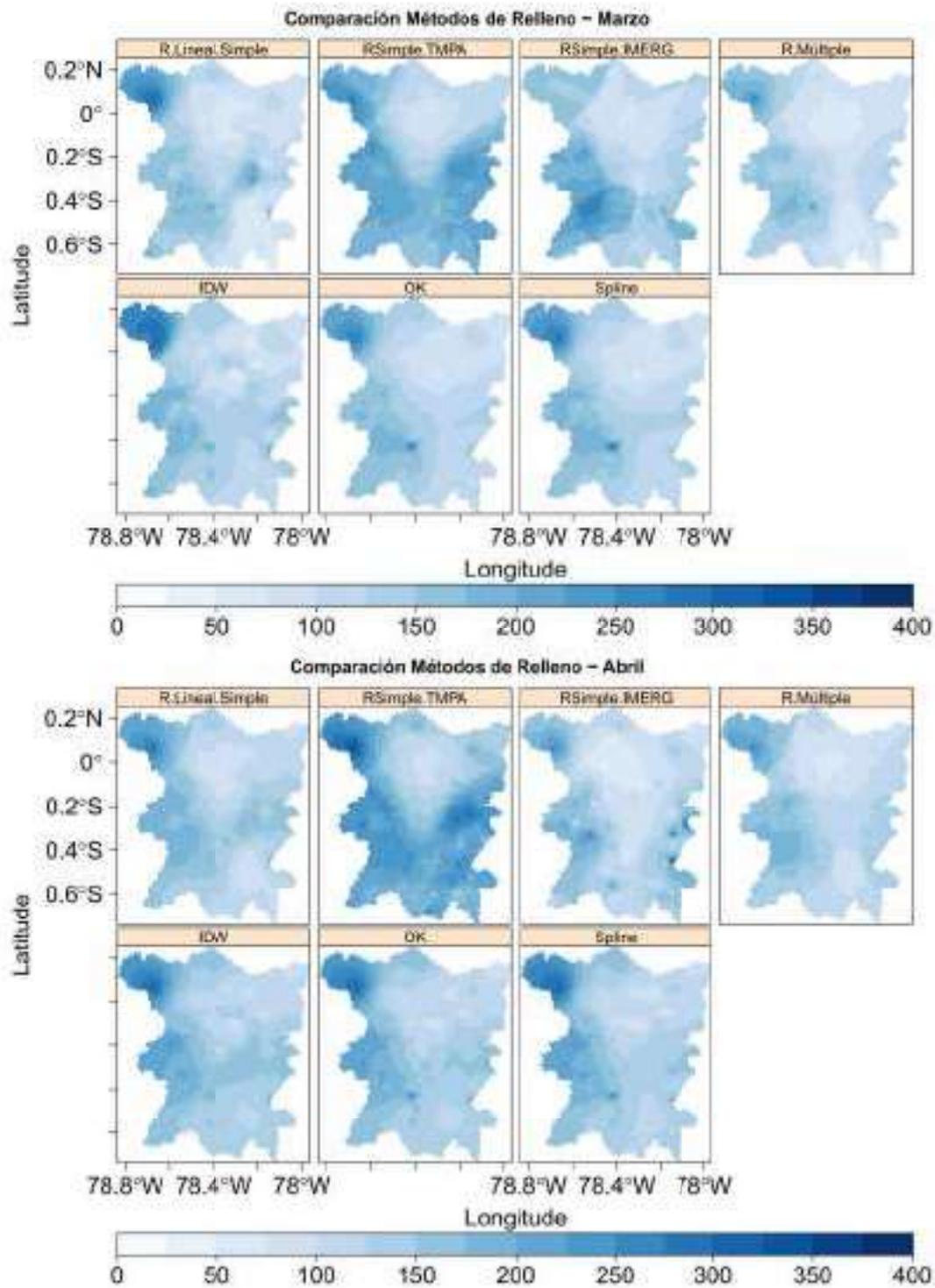
Repetir el mismo proceso para cada producto corregido por los métodos de corrección (DS, KED, MBC, BC)

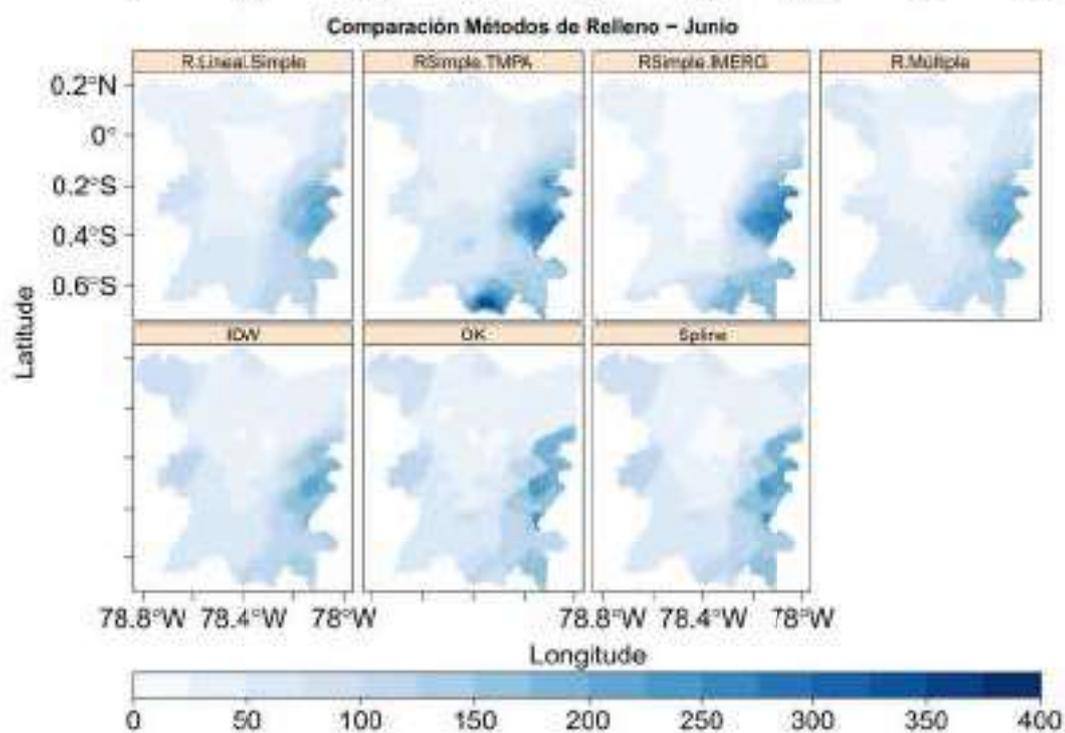
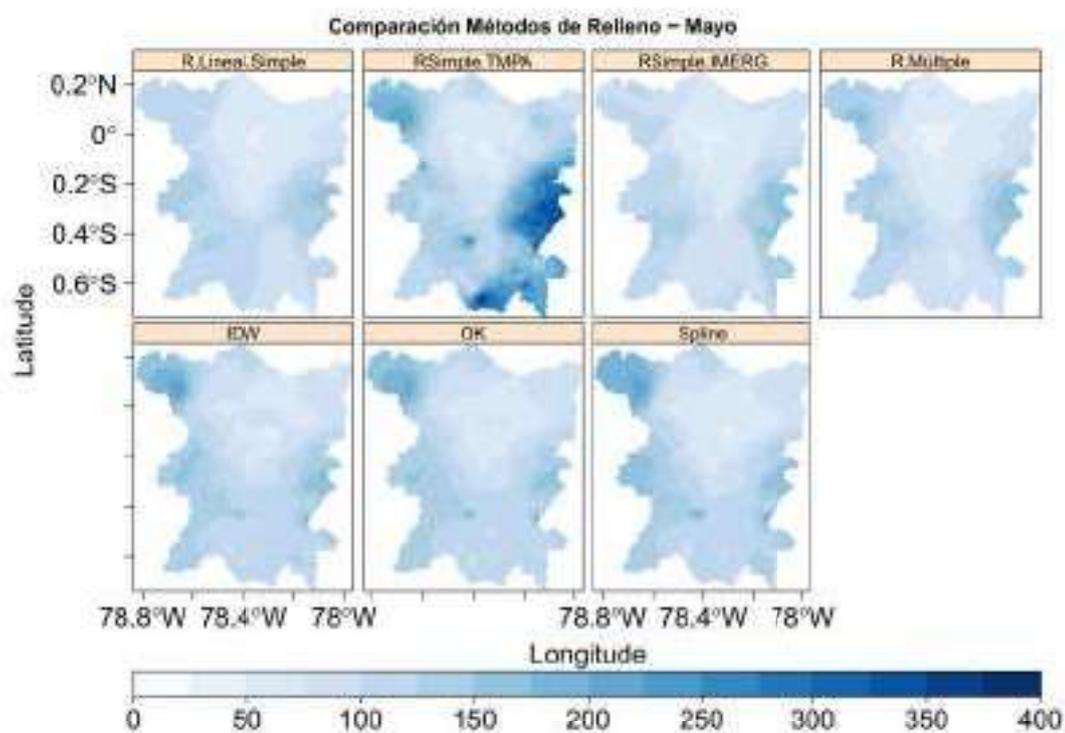
## **ANEXO 7**

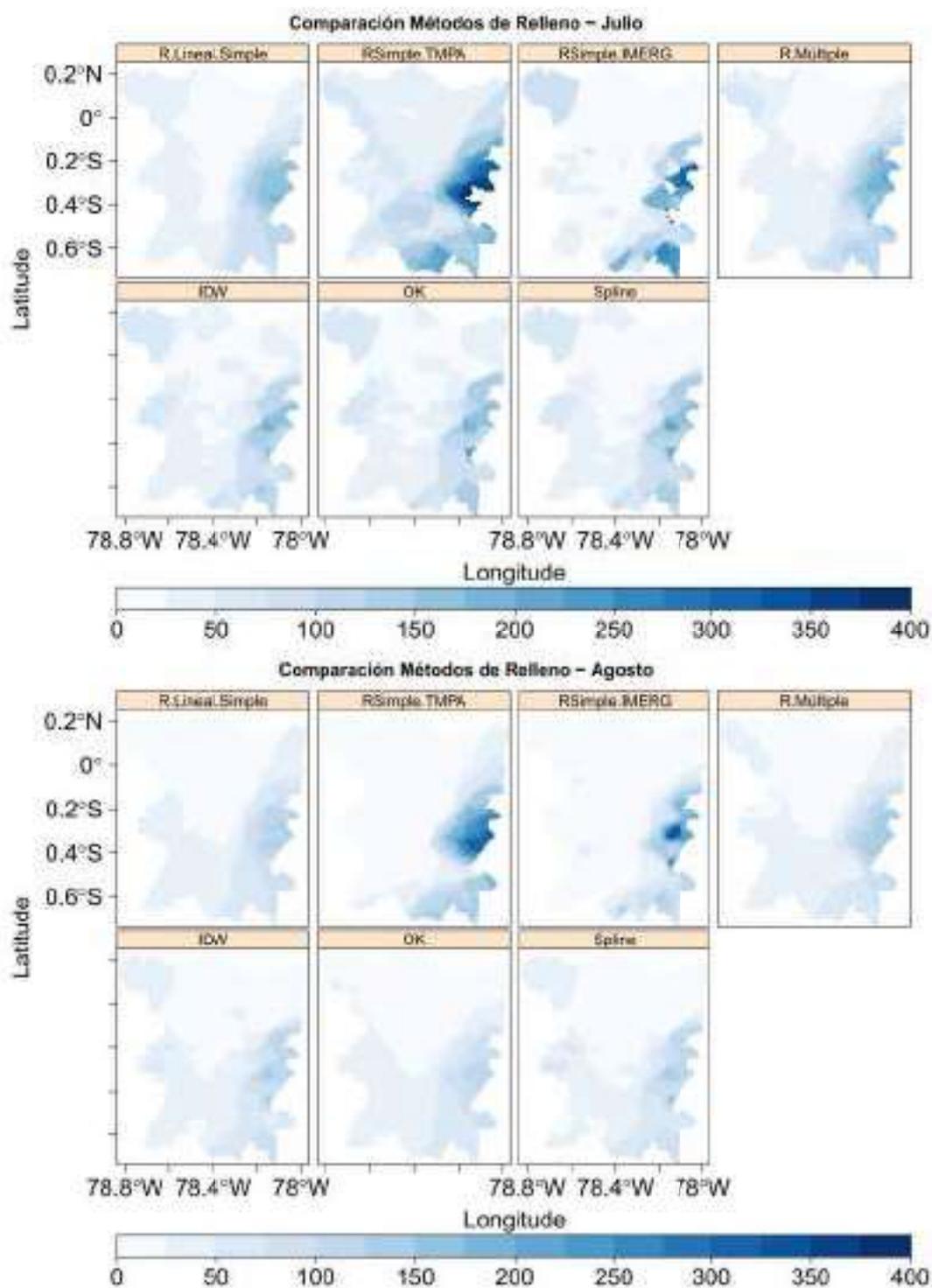
### **Mapas Isoyetas con diferentes métodos de relleno**

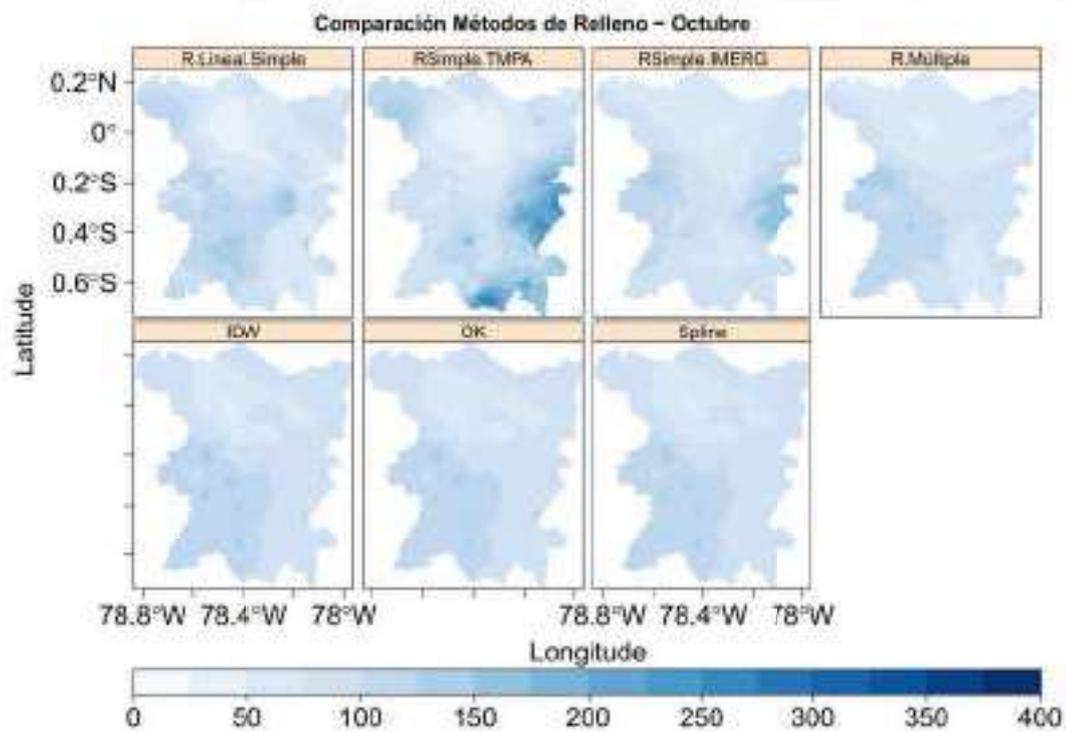
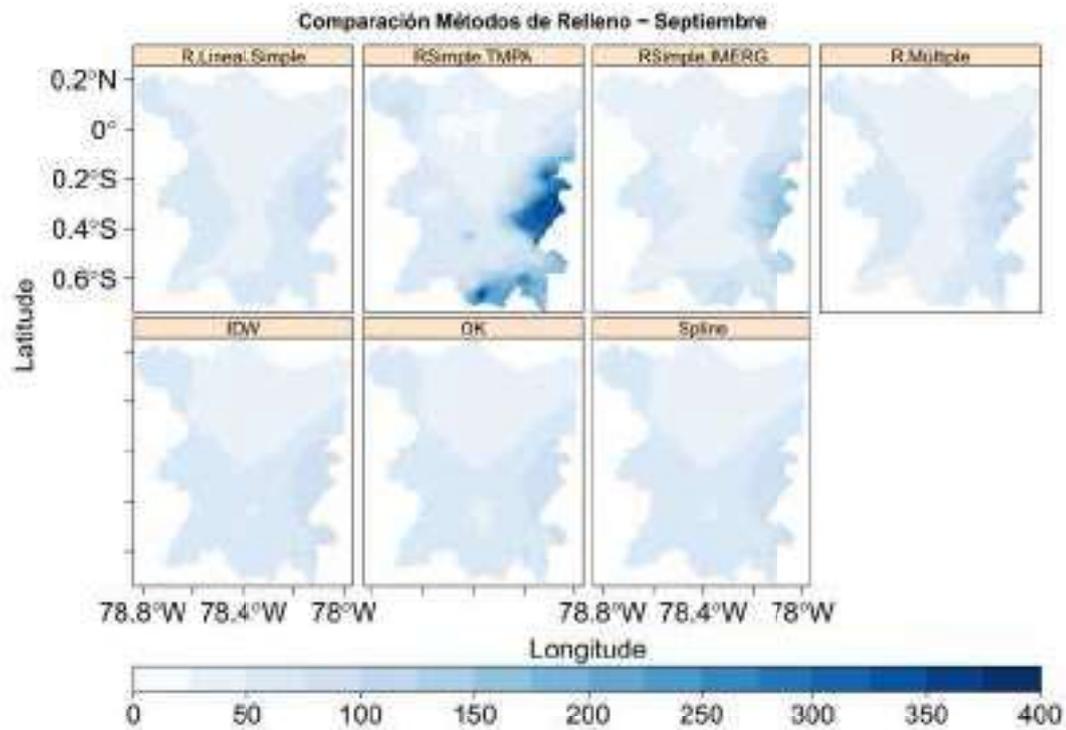
FIGURA 7.1: Interpolación IDW











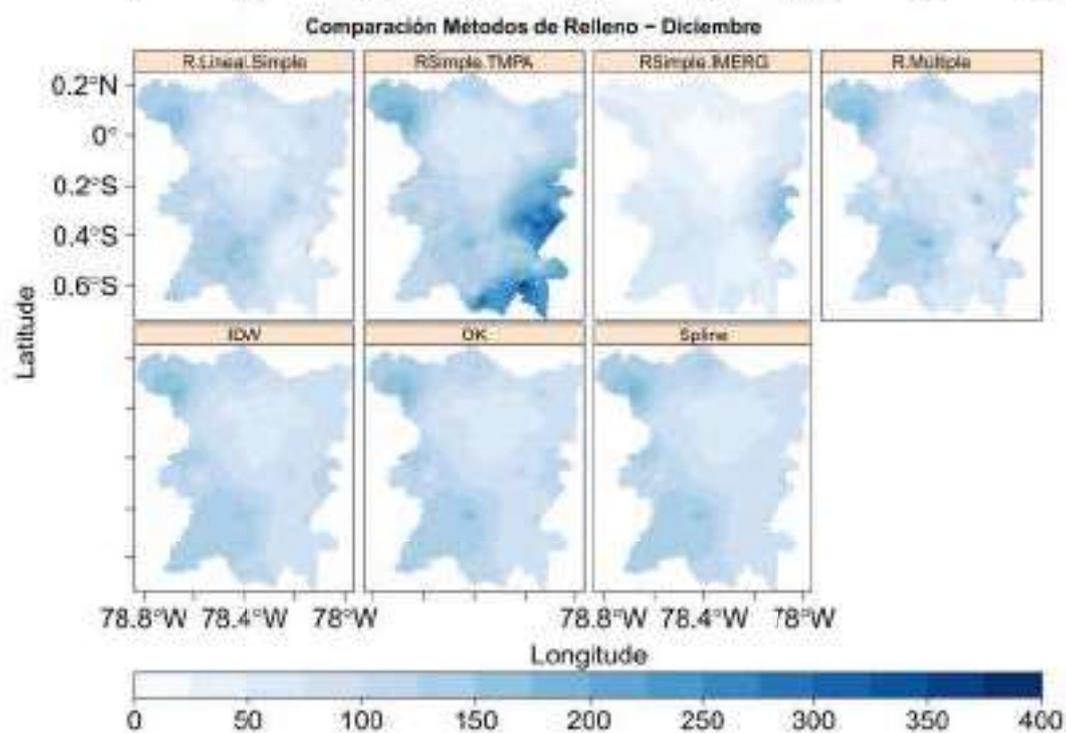
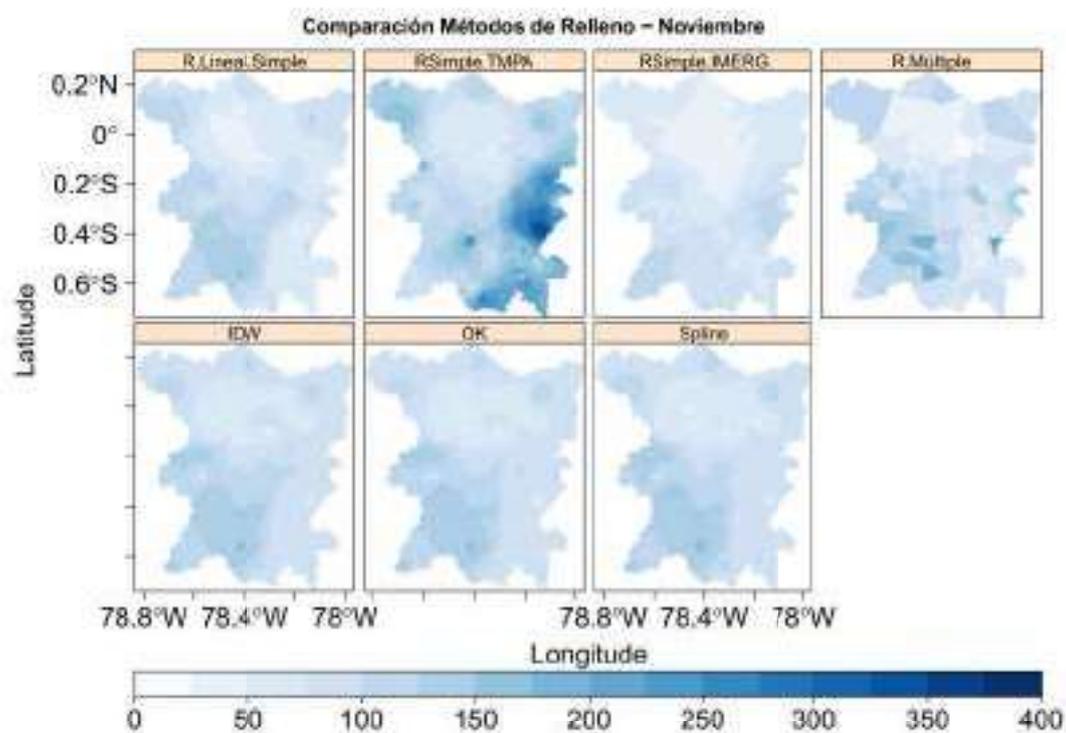
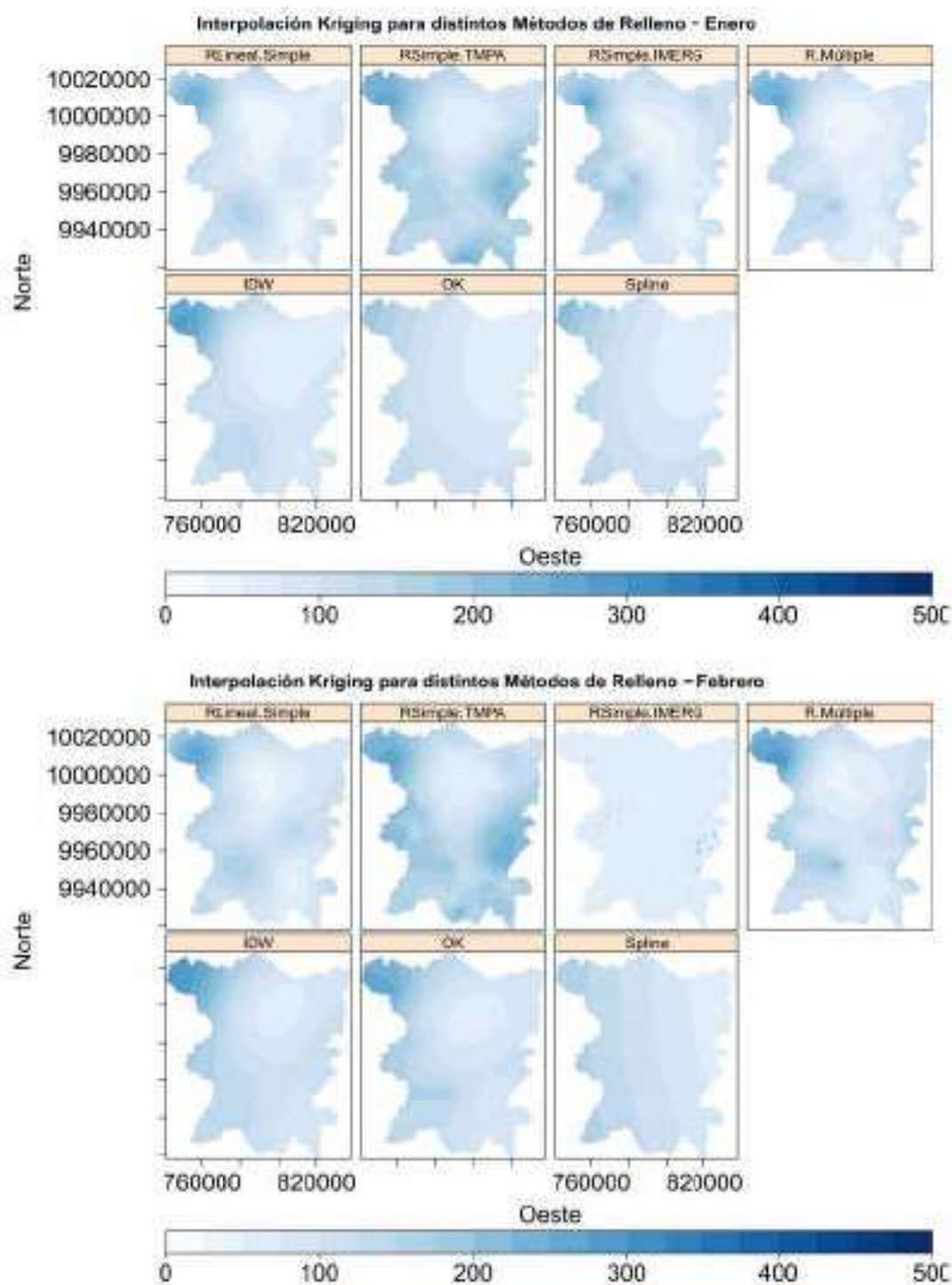
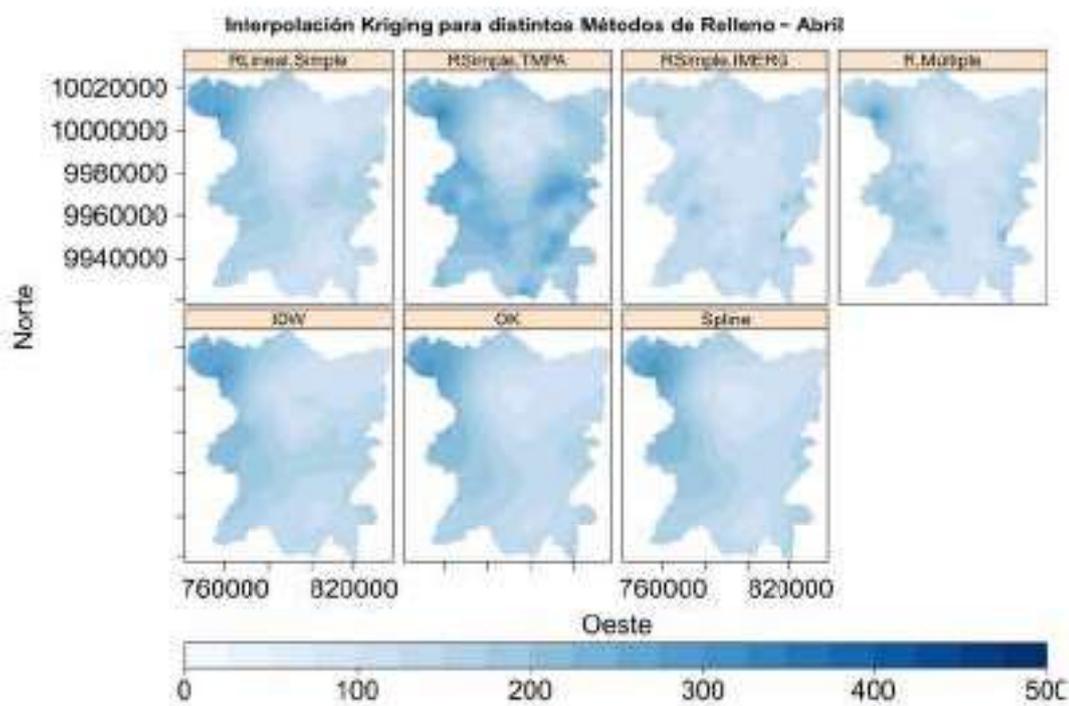
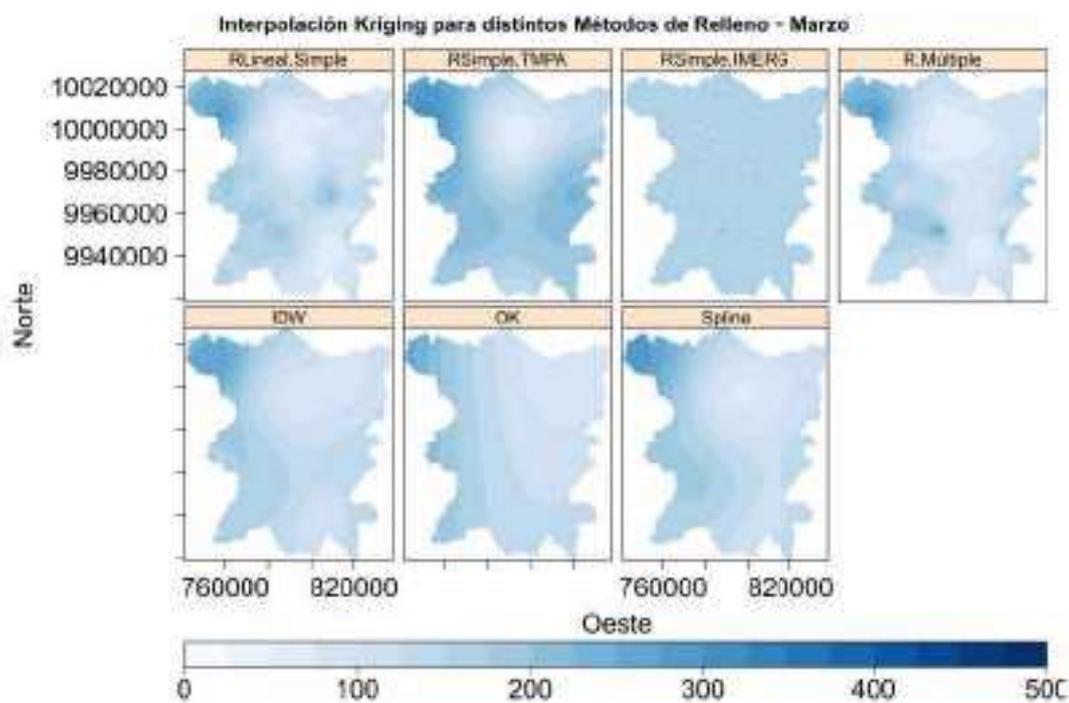
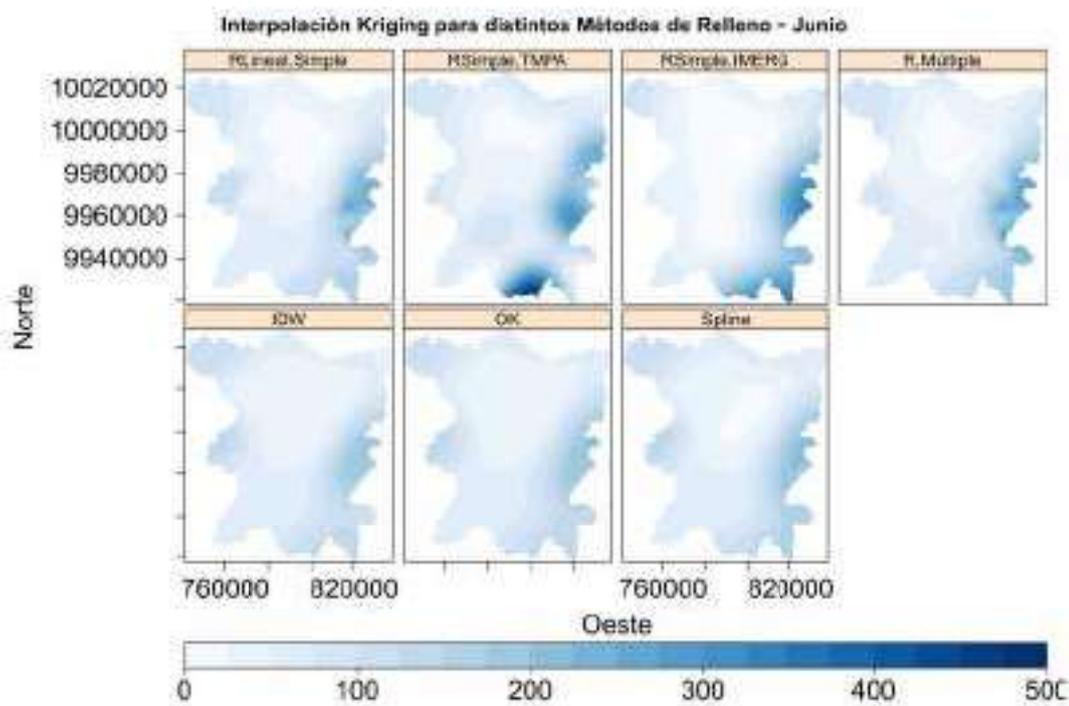
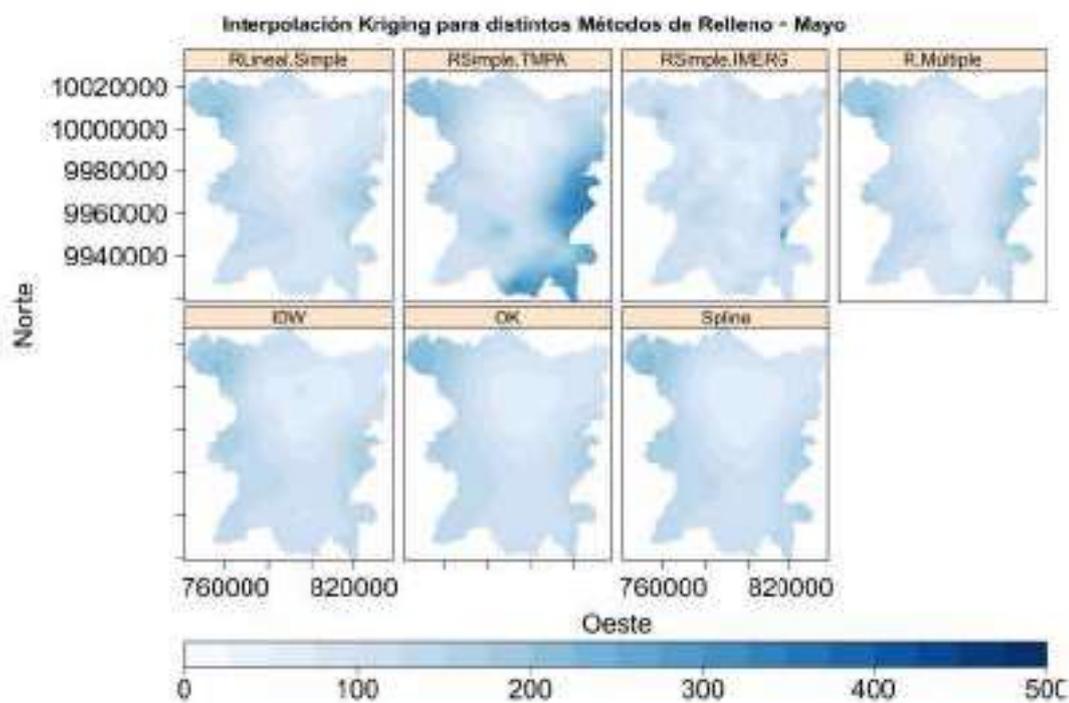
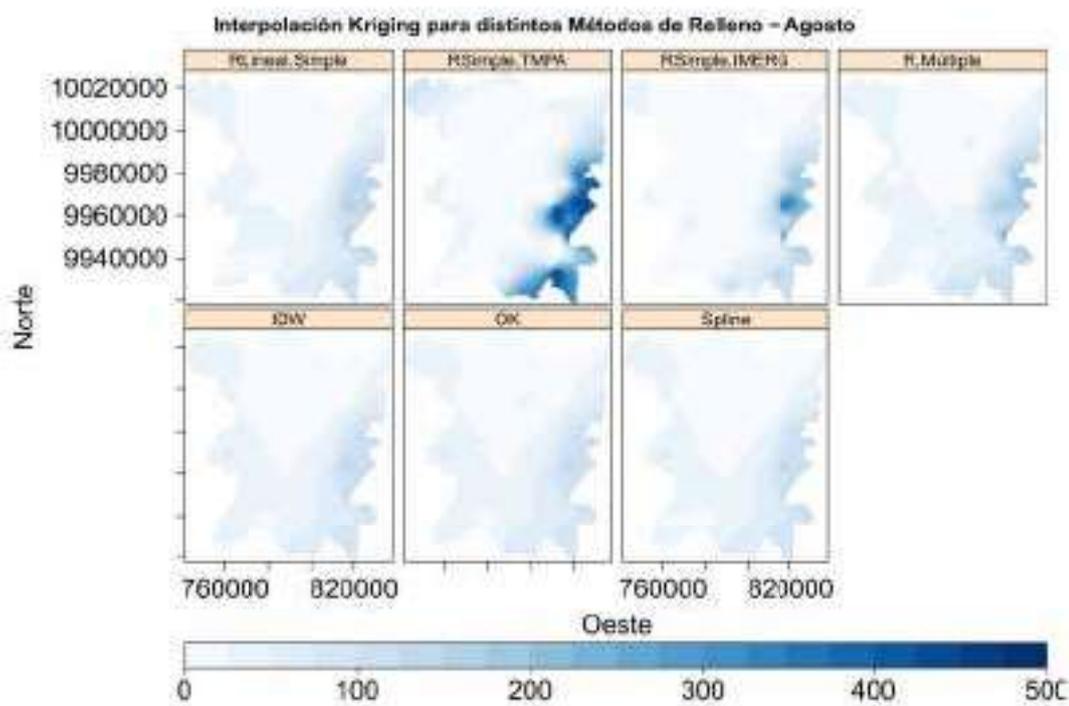
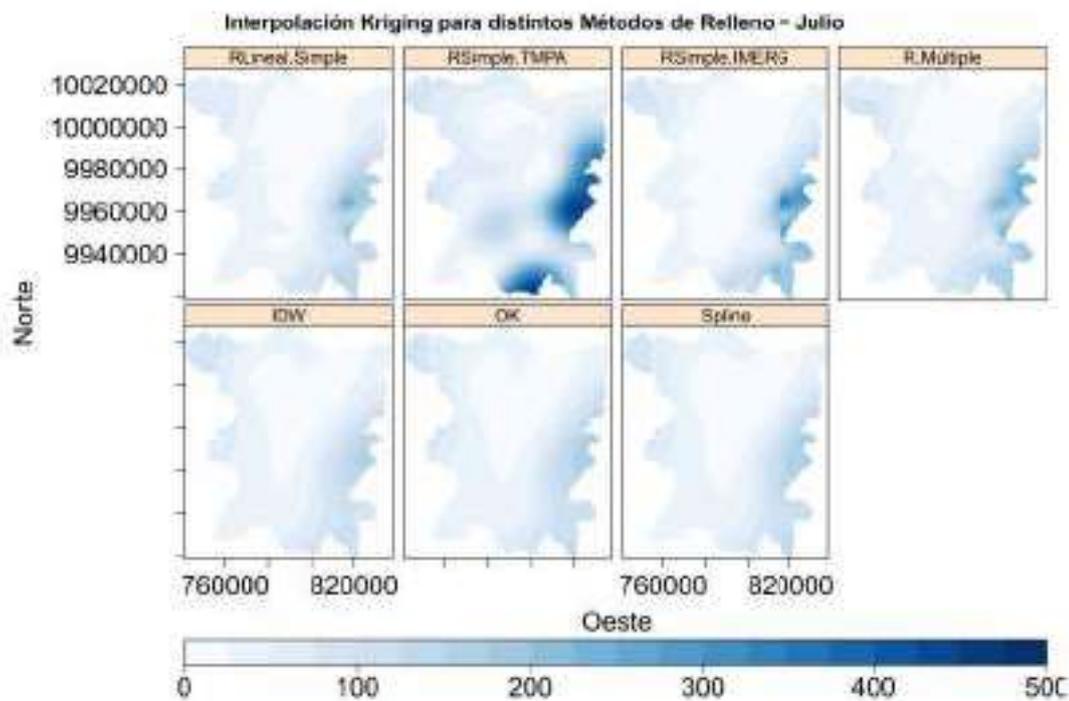


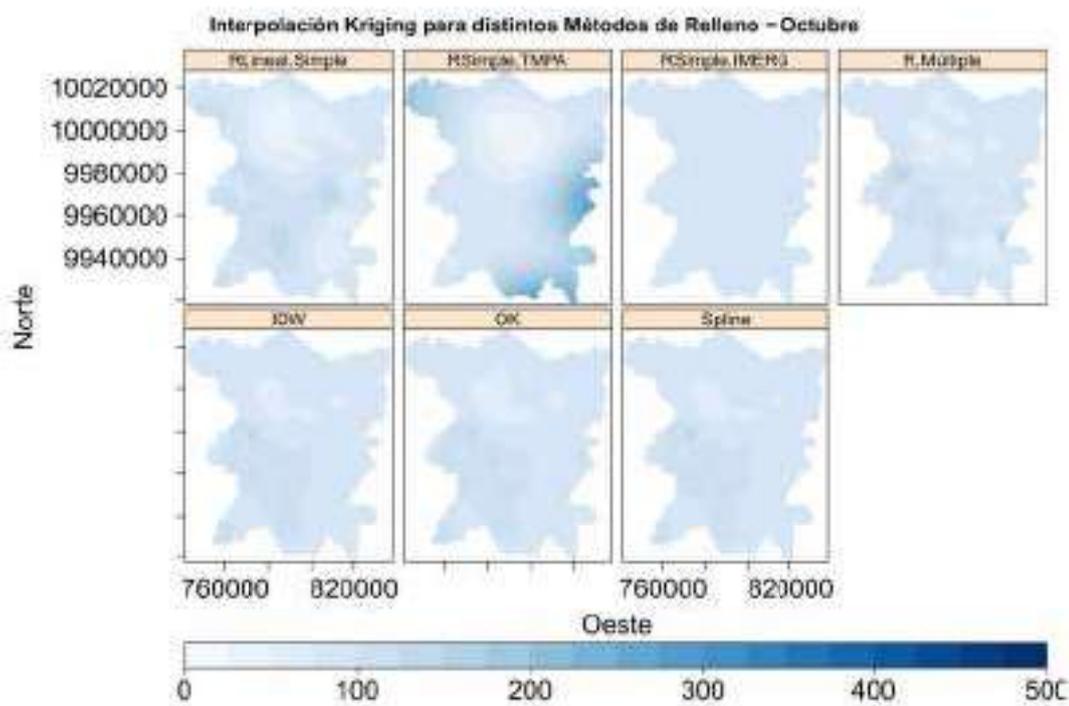
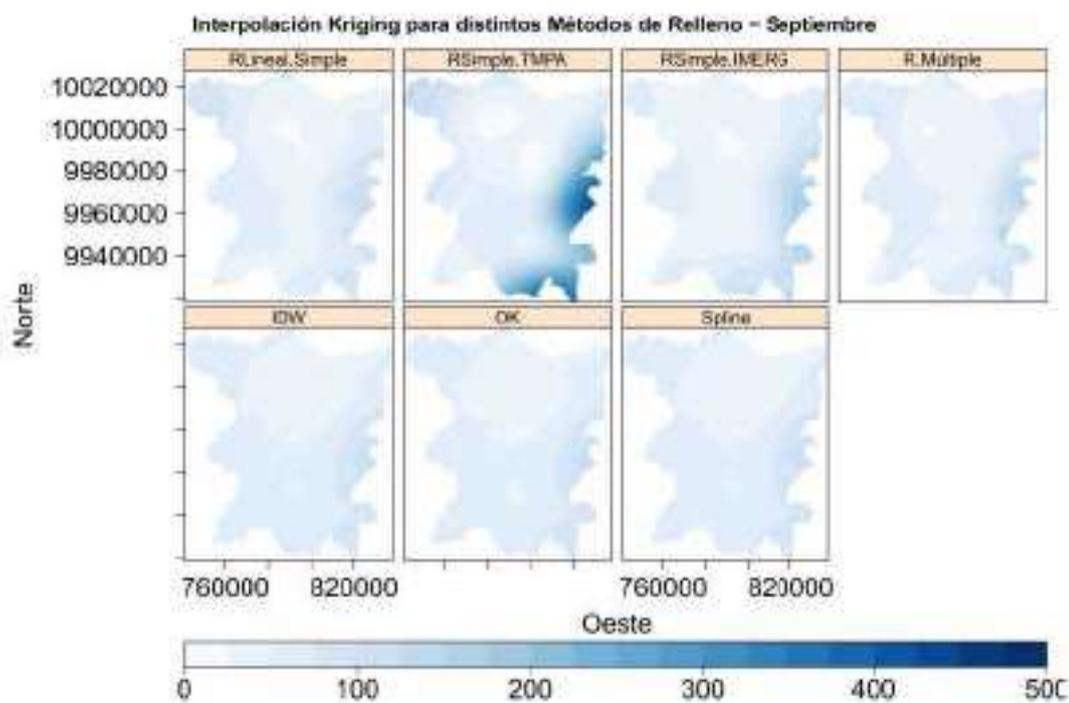
FIGURA 7.2: Interpolación Kriging











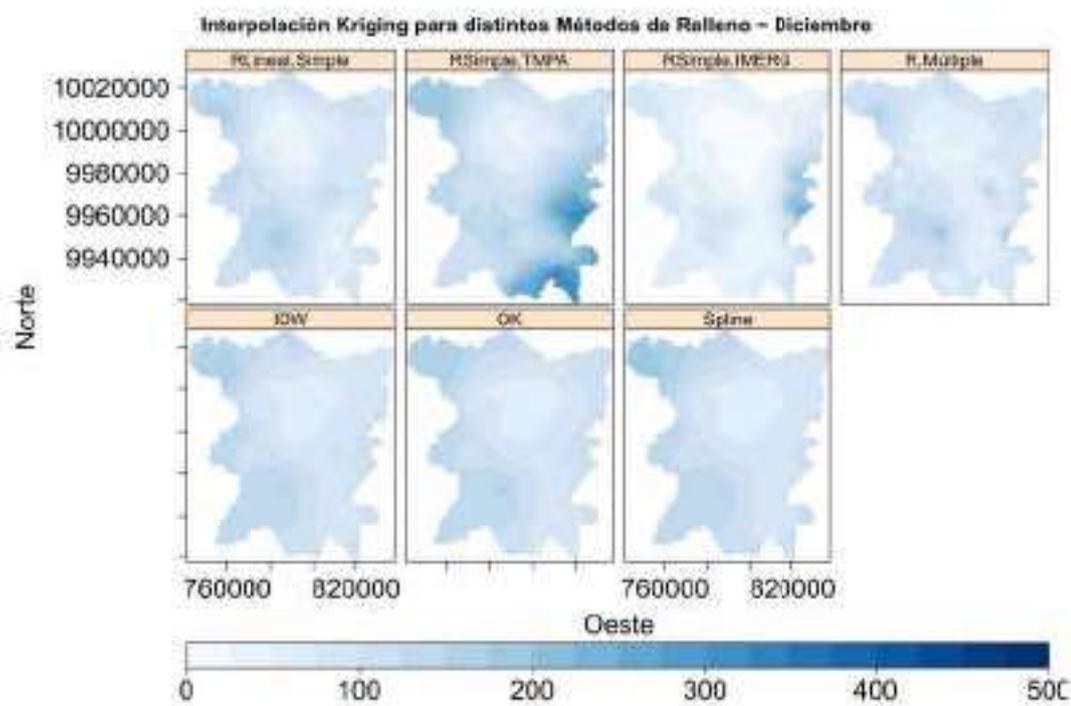
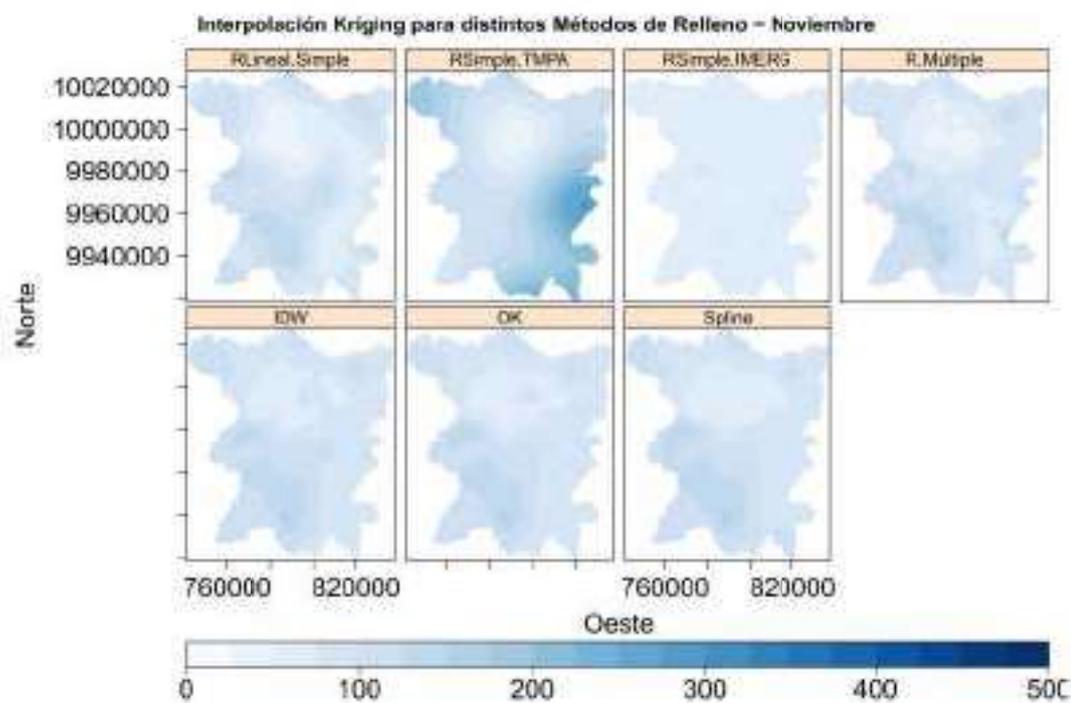
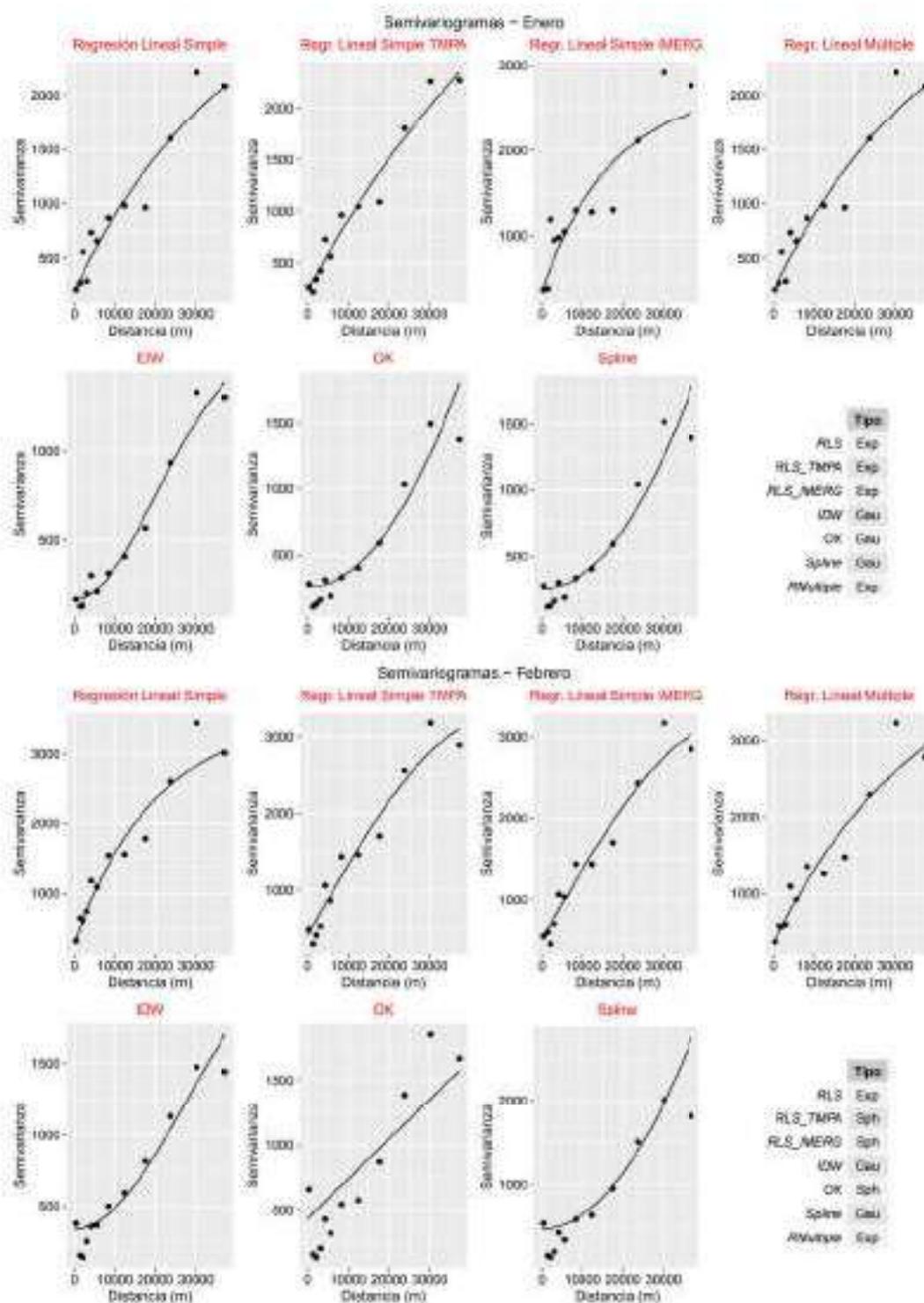
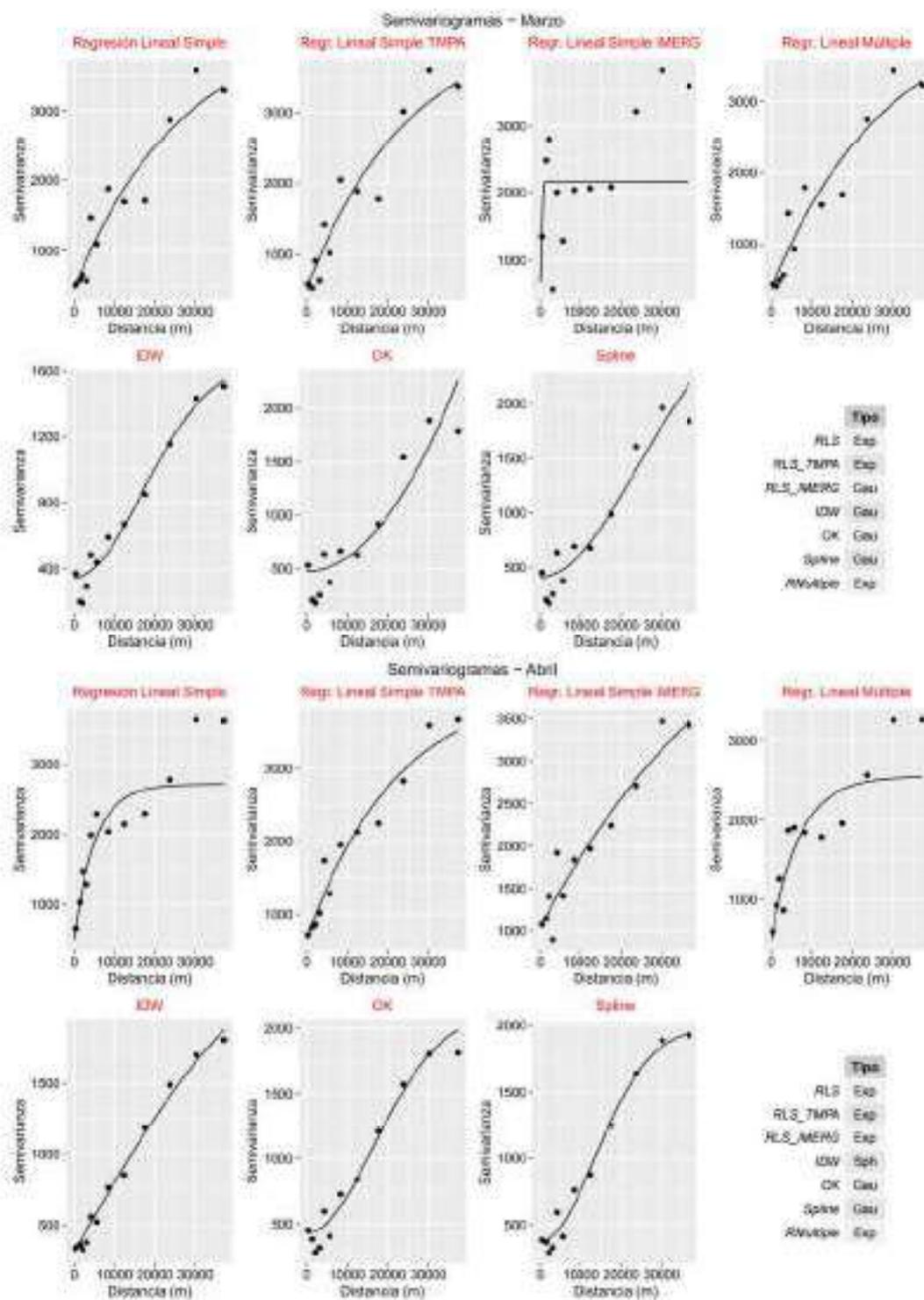
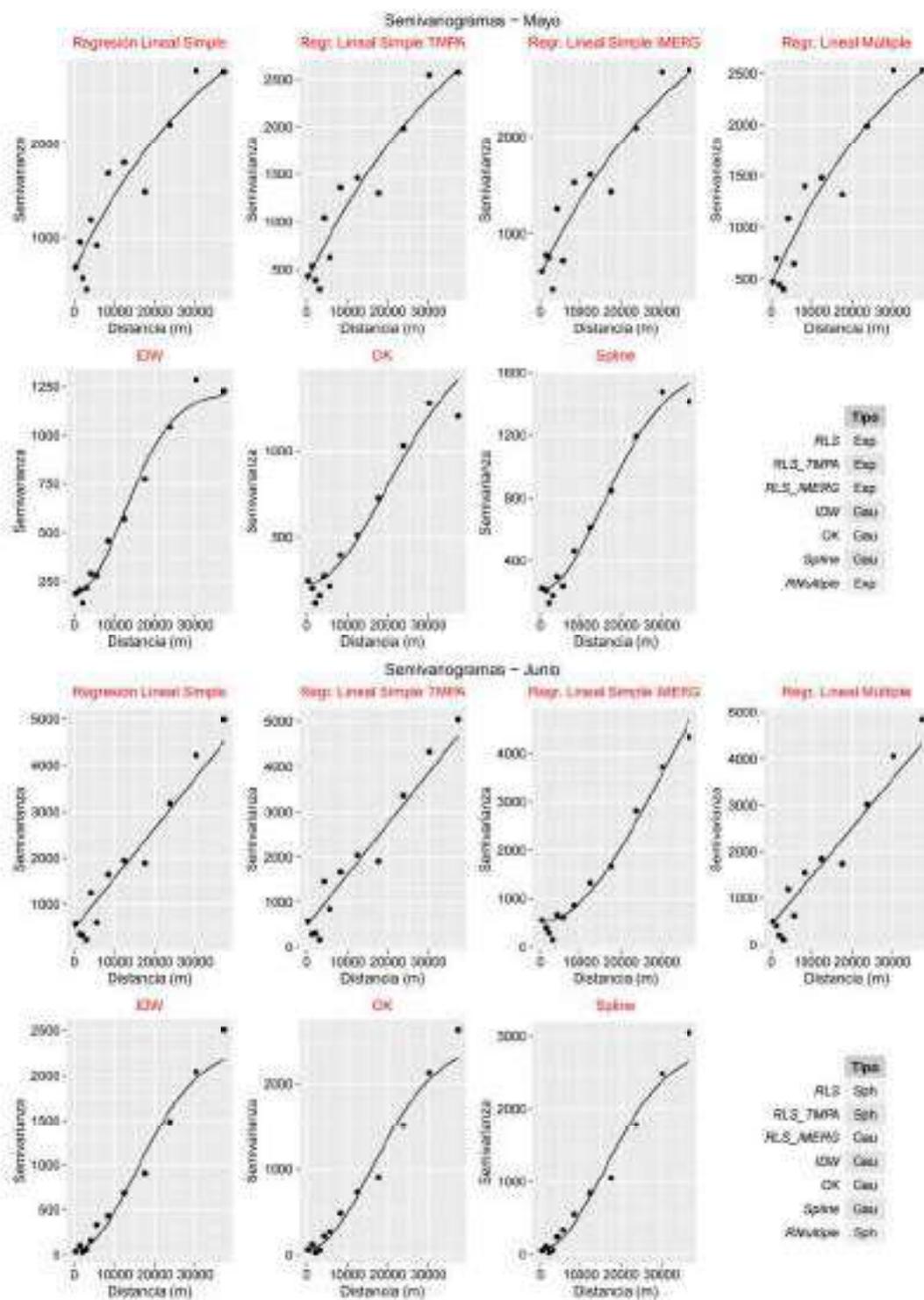
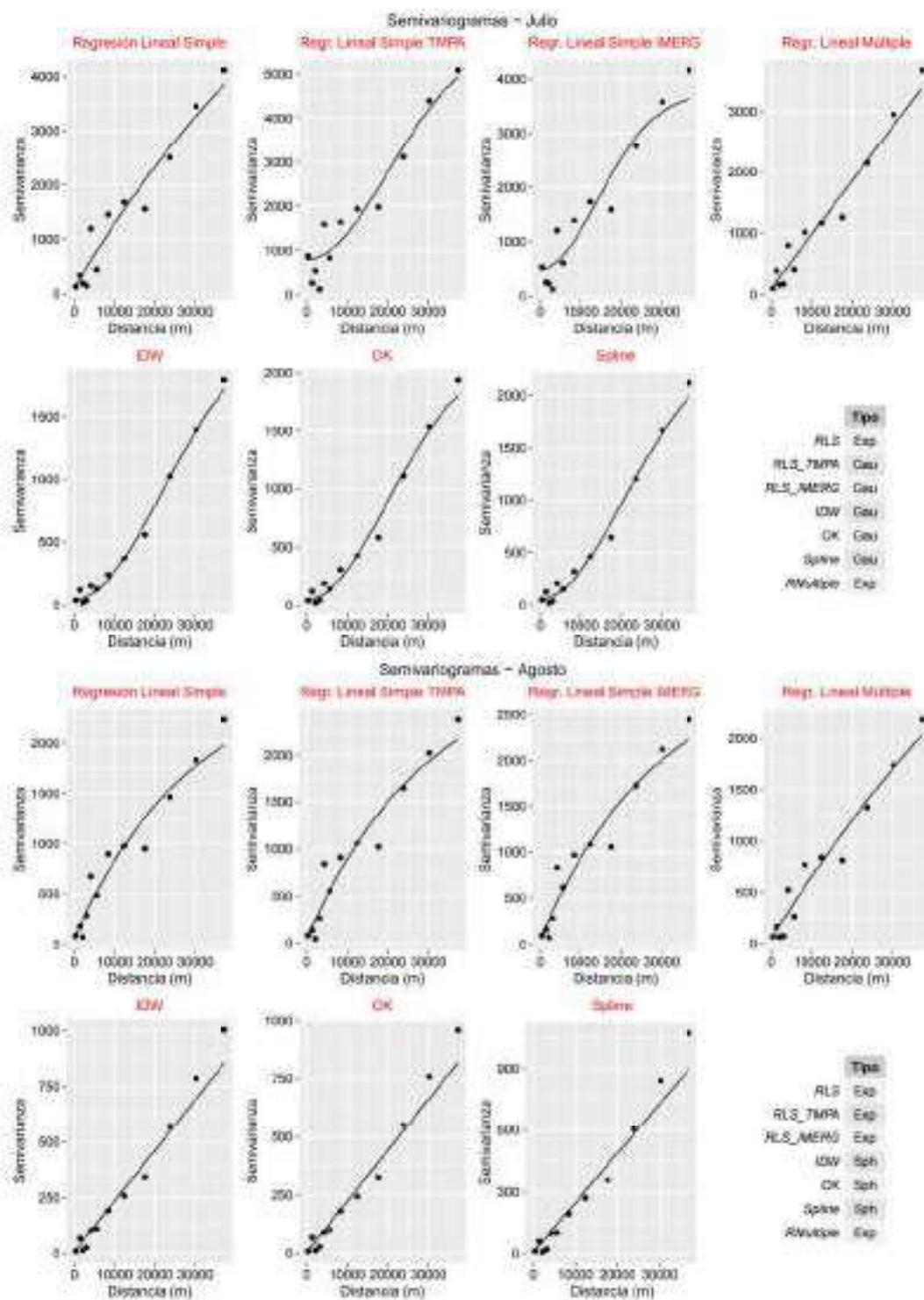


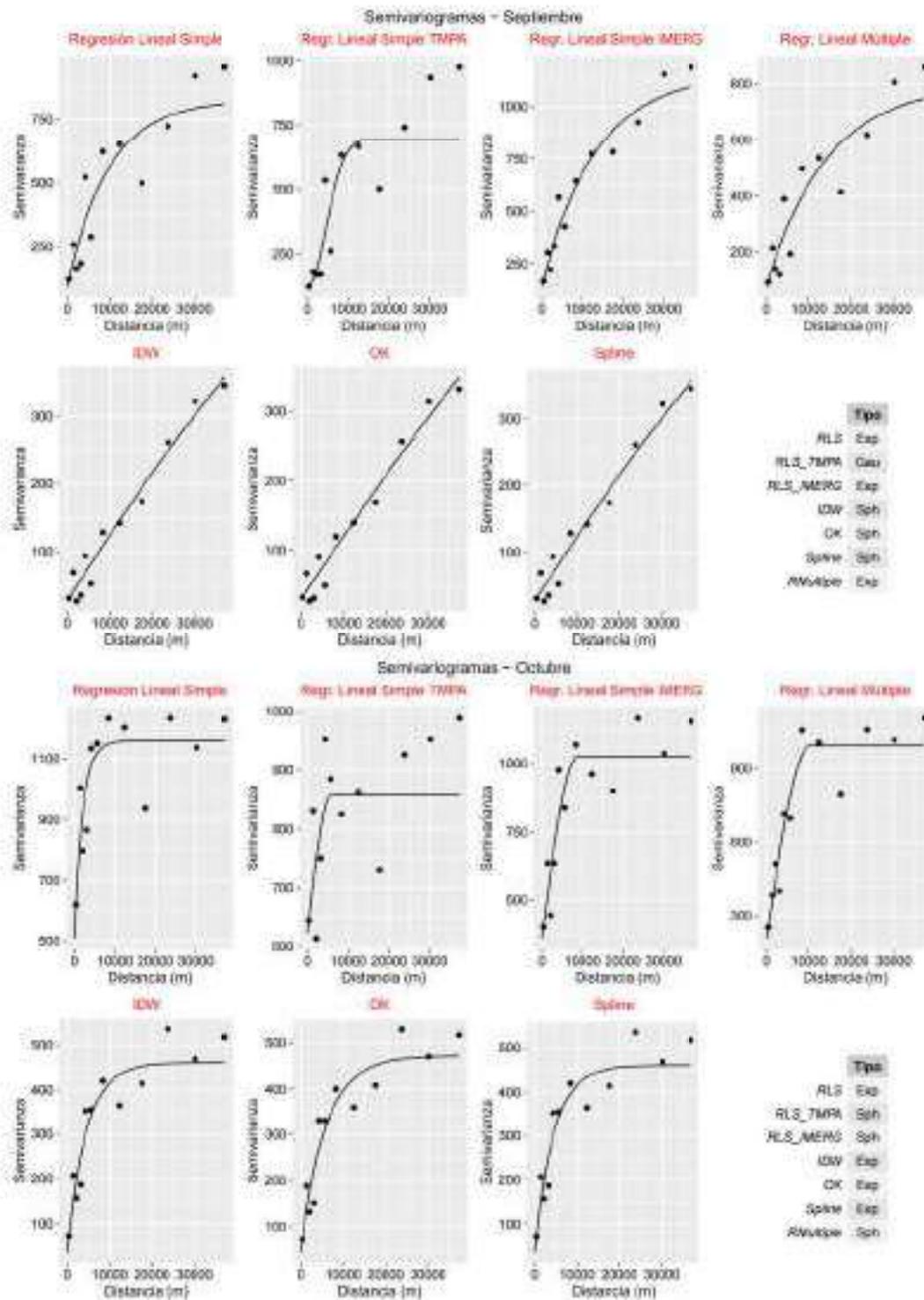
FIGURA 7.3: Semivariogramas utilizados para la Interpolación Kriging

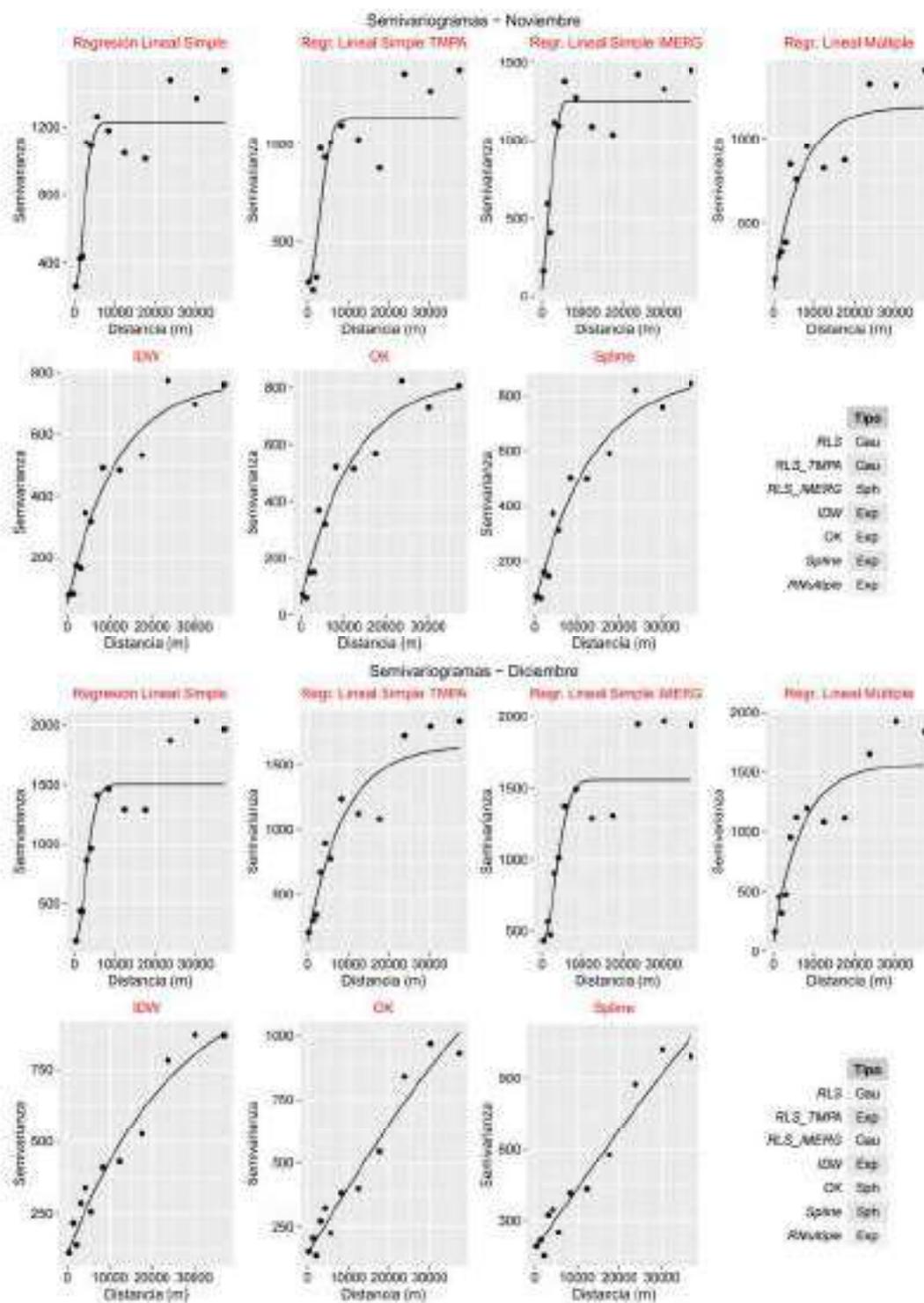












**ANEXO 8****Tablas Métricas Estadísticas**

**Tabla A.1** Errores Estadísticos entre datos observados (Base sin Relleno) y el producto satelital TMPA v7

Subcuenca	PBias %	MAE	RMSE (mm)	Pearson (r)	Concordancia (d)
ANTISANA	41.39	59.33	72.92	0.20	0.43
CHALPI GRANDE	-34.36	79.17	102.26	-0.04	0.38
CINTO	-31.44	48.81	81.42	0.62	0.73
GUAYLLABAMBA ALTO	13.05	37.44	47.94	0.79	0.84
GUAYLLABAMBA MEDIO	17.41	37.75	56.20	0.76	0.81
MINDO	-62.09	68.93	75.47	0.62	0.60
OYACACHI	-3.05	60.65	81.15	0.07	0.41
PAPALLACTA	-2.49	78.14	100.93	-0.08	0.30
PISQUE	64.65	66.91	74.22	0.78	0.62
PITA	5.74	36.91	47.20	0.70	0.81
QUIJOS	55.85	81.06	74.66	0.46	0.51
SAN PEDRO	-11.29	35.42	48.84	0.80	0.86
TAMBOYACU	18.71	54.88	72.40	0.06	0.40

**Tabla A.2** PBias% para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	32.24	30.78	29.04	91.10	-4.85	77.09
CHALPI GRANDE	3.20	4.90	4.77	-1.70	-54.17	-13.90
CINTO	-18.66	-16.40	-17.94	-12.40	-15.56	-7.20
GUAYLLABAMBA ALTO	30.28	33.13	35.67	46.55	19.66	50.82
GUAYLLABAMBA MEDIO	34.31	37.37	37.40	60.00	40.72	74.52
MINDO	-6.30	-10.75	-12.50	3.90	-31.90	-2.50
OYACACHI	15.88	17.78	16.50	19.28	-39.33	26.63
PAPALLACTA	10.58	12.50	10.99	39.35	-47.64	14.30
PISQUE	108.20	103.25	107.10	132.28	97.57	124.72
PITA	10.16	10.27	9.87	14.18	-2.42	33.54
QUIJOS	47.80	45.10	36.60	112.00	40.10	87.20
SAN PEDRO	-6.54	-7.41	-7.24	-0.89	-33.18	-4.51
TAMBOYACU	21.00	21.70	19.60	47.50	-57.20	37.40
<b>Total</b>	<b>21.70</b>	<b>21.71</b>	<b>20.75</b>	<b>42.40</b>	<b>-5.25</b>	<b>38.31</b>

**Tabla A.3 Error medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto  
TMPA v7**

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	29.31	28.29	26.99	60.77	-20.18	49.83
CHALPI GRANDE	3.49	5.50	5.45	-3.79	-149.02	-27.39
CINTO	-23.35	-19.99	-22.23	-14.60	-20.43	-8.36
GUAYLLABAMBA ALTO	18.49	19.99	20.96	24.85	6.95	27.19
GUAYLLABAMBA MEDIO	20.13	21.63	21.40	27.66	18.76	31.92
MINDO	-6.85	-12.21	-14.54	3.83	-50.57	-2.59
OYACACHI	16.23	17.67	16.64	16.63	84.78	16.13
PAPALLACTA	8.75	10.02	8.53	18.47	-132.00	-5.68
PISQUE	59.92	58.13	59.23	66.46	53.19	65.54
PITA	9.02	9.11	8.77	10.35	-19.39	21.68
QUIJOS	41.89	40.27	34.70	71.99	38.99	60.73
SAN PEDRO	-8.15	-10.46	-10.29	-3.05	22.41	9.38
TAMBOYACU	19.77	20.30	18.60	35.44	-147.14	29.64
<b>Total</b>	<b>14.51</b>	<b>14.48</b>	<b>13.40</b>	<b>24.23</b>	<b>40.62</b>	<b>19.17</b>

**Tabla A.4 Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7**

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	40.26	39.43	38.51	74.37	58.29	76.45
CHALPI GRANDE	42.94	45.57	47.56	60.75	191.71	107.59
CINTO	29.05	26.19	28.12	24.62	29.87	44.76
GUAYLLABAMBA ALTO	28.87	30.53	31.59	36.31	30.92	56.53
GUAYLLABAMBA MEDIO	34.18	35.00	35.67	43.49	38.83	64.11
MINDO	12.75	16.72	19.49	18.76	65.14	58.63
OYACACHI	37.44	38.36	40.94	58.36	104.36	80.92
PAPALLACTA	48.57	50.12	52.13	80.56	162.23	105.67
PISQUE	61.61	59.76	60.69	68.55	57.14	76.92
PITA	21.13	20.73	21.12	29.40	49.88	58.45
QUIJOS	46.33	46.99	44.40	77.13	39.90	78.36
SAN PEDRO	20.78	24.92	24.96	22.17	33.31	58.61
TAMBOYACU	25.46	25.41	25.06	49.59	191.05	68.80
<b>Total</b>	<b>34.57</b>	<b>35.36</b>	<b>36.17</b>	<b>49.54</b>	<b>80.97</b>	<b>71.98</b>

**Tabla A.5** Error medio absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	34.79	34.75	33.60	64.76	48.34	63.44
CHALPI GRANDE	36.93	39.73	41.63	51.79	151.63	85.12
CINTO	25.82	23.12	24.91	20.52	23.07	31.01
GUAYLLABAMBA ALTO	25.32	27.08	28.15	31.86	27.39	44.72
GUAYLLABAMBA MEDIO	30.90	31.60	32.02	39.65	35.72	51.36
MINDO	10.93	14.41	16.65	14.17	53.70	40.75
OYACACHI	34.11	34.85	37.49	51.65	89.08	62.63
PAPALLACTA	42.42	43.07	44.87	69.39	136.14	83.93
PISQUE	59.92	58.13	59.23	66.46	55.29	69.19
PITA	18.03	17.89	18.19	25.91	42.51	46.62
QUIJOS	41.89	41.40	39.97	71.99	38.99	64.58
SAN PEDRO	17.14	20.12	20.10	18.13	27.57	40.63
TAMBOYACU	20.92	21.15	20.48	41.13	164.88	53.34
<b>Total</b>	<b>30.70</b>	<b>31.33</b>	<b>32.10</b>	<b>43.65</b>	<b>68.95</b>	<b>56.72</b>

**Tabla A.6** Coeficiente de correlación de Pearson (r) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	0.65	0.66	0.66	-0.02	0.71	0.25
CHALPI GRANDE	0.26	0.13	0.11	-0.15	-0.68	-0.10
CINTO	0.94	0.94	0.94	0.92	1.00	0.79
GUAYLLABAMBA ALTO	0.94	0.94	0.93	0.92	0.97	0.71
GUAYLLABAMBA MEDIO	0.98	0.97	0.97	0.97	0.98	0.77
MINDO	0.98	0.97	0.97	0.93	0.94	0.62
OYACACHI	0.39	0.41	0.26	-0.18	0.42	0.09
PAPALLACTA	0.13	0.11	0.06	-0.22	-0.45	-0.01
PISQUE	0.96	0.96	0.96	0.95	0.98	0.78
PITA	0.91	0.92	0.92	0.82	0.77	0.59
QUIJOS	0.84	0.72	0.61	0.66	0.99	0.45
SAN PEDRO	0.95	0.94	0.95	0.95	0.90	0.75
TAMBOYACU	0.92	0.94	0.92	0.22	-0.49	0.15
<b>Total</b>	<b>0.76</b>	<b>0.74</b>	<b>0.71</b>	<b>0.52</b>	<b>0.54</b>	<b>0.45</b>

**Tabla A.7** Índice de concordancia (d) para los pluviómetros de las subcuencas y producto TMPA v7

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal Simple TMPA	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	0.58	0.58	0.59	0.29	0.75	0.44
CHALPI GRANDE	0.54	0.45	0.44	0.26	0.37	0.34
CINTO	0.92	0.93	0.92	0.93	0.93	0.87
GUAYLLABAMBA ALTO	0.86	0.84	0.83	0.80	0.85	0.74
GUAYLLABAMBA MEDIO	0.86	0.85	0.84	0.77	0.82	0.72
MINDO	0.98	0.97	0.96	0.96	0.80	0.78
OYACACHI	0.58	0.56	0.50	0.29	0.59	0.42
PAPALLACTA	0.45	0.43	0.41	0.26	0.39	0.33
PISQUE	0.52	0.54	0.53	0.47	0.59	0.59
PITA	0.91	0.91	0.91	0.82	0.82	0.69
QUIJOS	0.59	0.55	0.60	0.27	0.79	0.50
SAN PEDRO	0.95	0.93	0.93	0.94	0.91	0.82
TAMBOYACU	0.81	0.81	0.81	0.34	0.35	0.42
<b>Total</b>	<b>0.73</b>	<b>0.72</b>	<b>0.71</b>	<b>0.57</b>	<b>0.69</b>	<b>0.59</b>

**Tabla A.8** PBias% para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG V3

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal IMERG	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	42.95	41.37	39.49	88.72	67.52	90.09
CHALPI GRANDE	9.20	11.00	10.90	11.00	-29.40	1.13
CINTO	4.46	7.36	5.39	12.96	32.59	32.76
GUAYLLABAMBA ALTO	56.20	59.45	62.39	78.08	118.63	86.32
GUAYLLABAMBA MEDIO	56.55	60.08	60.13	86.78	129.08	110.02
MINDO	20.05	14.30	12.00	32.90	19.10	26.50
OYACACHI	28.93	31.08	29.68	34.53	32.33	40.20
PAPALLACTA	22.35	24.44	22.76	51.84	9.41	30.29
PISQUE	119.28	114.23	118.28	136.97	141.33	127.90
PITA	17.32	17.48	17.07	21.40	63.27	43.97
QUIJOS	61.80	58.80	49.50	122.20	44.20	103.20
SAN PEDRO	8.73	7.86	8.02	15.76	25.97	12.46
TAMBOYACU	32.10	32.80	30.50	63.80	26.10	53.70
<b>TOTAL</b>	<b>36.92</b>	<b>36.94</b>	<b>35.85</b>	<b>58.19</b>	<b>52.32</b>	<b>58.35</b>

**Tabla A.9** Error medio (ME) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal IMERG	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	39.16	38.14	36.85	59.55	44.15	58.81
CHALPI GRANDE	11.30	13.30	13.26	12.09	-59.99	-6.15
CINTO	5.43	8.79	6.54	14.69	31.17	30.33
GUAYLLABAMBA ALTO	39.73	41.23	42.20	46.78	56.08	50.92
GUAYLLABAMBA MEDIO	37.48	38.98	38.74	45.42	55.24	51.50
MINDO	21.57	16.21	13.88	32.04	6.62	27.12
OYACACHI	29.71	31.16	30.12	31.72	23.46	32.47
PAPALLACTA	21.86	23.13	21.64	29.74	-16.38	11.10
PISQUE	65.65	63.86	64.96	68.52	68.65	65.72
PITA	16.00	16.10	15.76	17.16	32.84	29.90
QUIJOS	54.12	52.51	46.93	78.56	43.80	72.54
SAN PEDRO	8.45	6.14	6.31	13.91	23.44	8.17
TAMBOYACU	30.14	30.67	28.98	47.63	25.34	42.73
TOTAL	29.28	29.25	28.17	38.29	25.72	36.55

**Tabla A.10** Raíz del error medio (RMSE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal IMERG	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	49.27	48.22	46.59	74.68	68.71	71.41
CHALPI GRANDE	44.20	47.54	48.30	61.19	124.50	69.90
CINTO	34.81	36.17	35.20	35.87	42.25	46.81
GUAYLLABAMBA ALTO	50.70	52.05	52.97	58.71	68.44	62.21
GUAYLLABAMBA MEDIO	53.78	54.81	55.45	62.17	67.55	70.64
MINDO	37.98	35.69	35.88	47.84	65.84	41.80
OYACACHI	46.37	48.11	48.74	64.15	71.44	68.91
PAPALLACTA	51.56	54.12	54.89	83.09	101.80	83.97
PISQUE	70.07	68.41	69.30	73.45	71.49	71.10
PITA	32.08	31.98	32.21	38.23	59.03	48.05
QUIJOS	59.07	58.75	54.29	84.95	59.94	79.31
SAN PEDRO	33.45	36.98	37.39	36.57	45.86	42.27
TAMBOYACU	36.05	36.45	35.34	58.29	66.41	54.53
TOTAL	46.11	46.87	46.66	59.94	70.25	62.38

**Tabla A.11** Error medio absoluto (MAE) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal IMERG	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	39.94	39.07	37.93	61.78	59.07	61.90
CHALPI GRANDE	34.80	37.86	38.78	50.26	100.52	57.35
CINTO	25.37	26.15	25.54	25.22	35.93	38.77
GUAYLLABAMBA ALTO	42.95	44.31	45.43	50.94	62.65	54.68
GUAYLLABAMBA MEDIO	46.54	47.70	47.99	55.64	62.26	63.47
MINDO	28.69	27.70	28.77	37.24	56.56	29.59
OYACACHI	36.97	37.91	40.19	52.98	58.51	56.67
PAPALLACTA	43.88	45.15	46.37	70.80	86.89	72.31
PISQUE	65.65	63.95	64.96	68.64	68.85	66.24
PITA	27.55	27.26	27.57	32.81	52.00	40.96
QUIJOS	54.12	52.51	46.93	78.56	48.17	72.54
SAN PEDRO	27.21	29.65	30.26	29.91	38.31	33.80
TAMBOYACU	30.14	30.67	28.98	47.63	54.81	42.74
TOTAL	38.75	39.22	39.21	50.95	60.35	53.16

**Tabla A.12** Coeficiente de correlación de Pearson (r) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

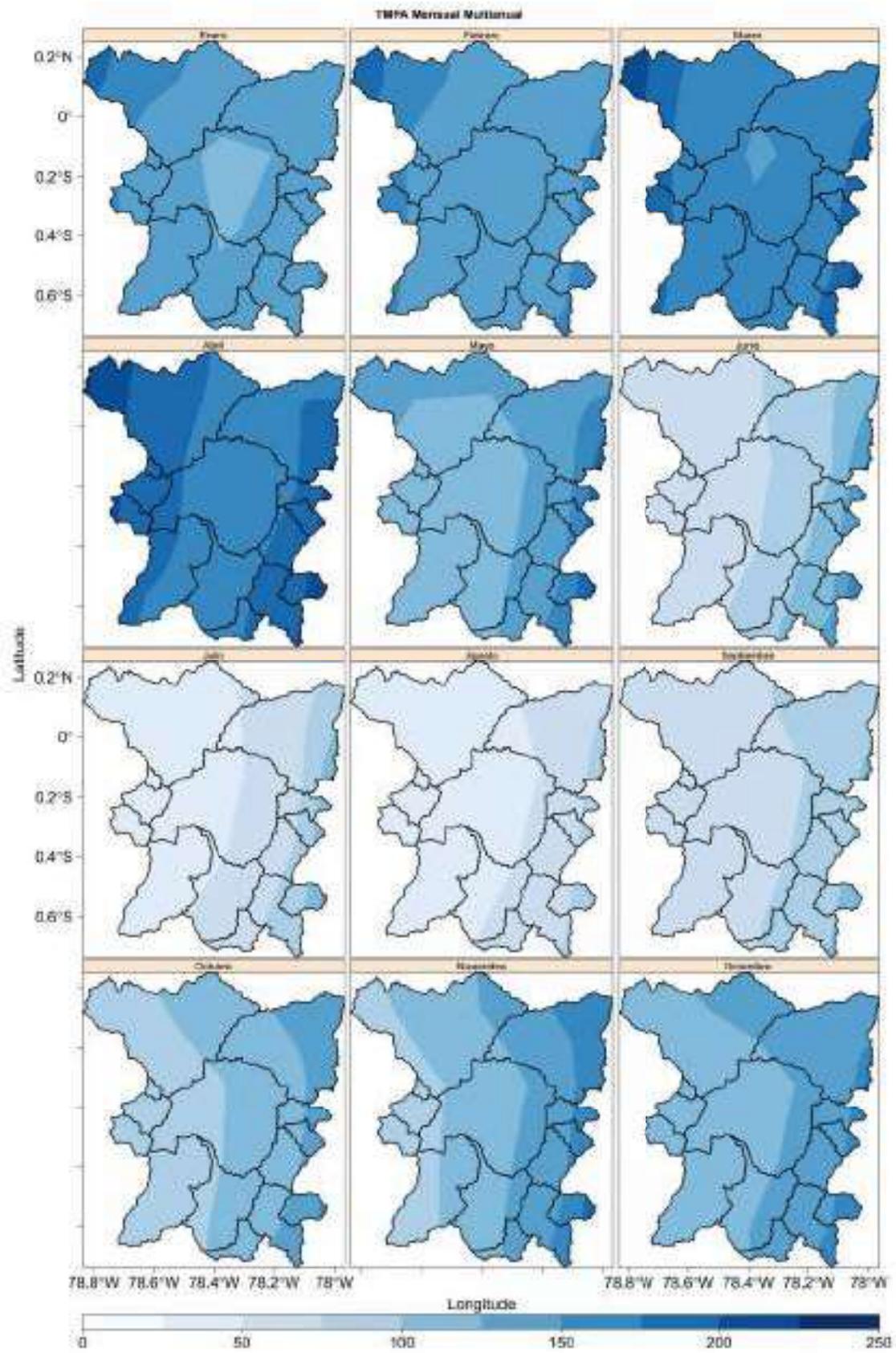
METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal IMERG	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	0.63	0.64	0.69	-0.05	0.42	0.24
CHALPI GRANDE	0.28	0.14	0.16	-0.05	-0.46	-0.11
CINTO	0.79	0.77	0.78	0.80	0.92	0.81
GUAYLLABAMBA ALTO	0.78	0.78	0.78	0.76	0.80	0.71
GUAYLLABAMBA MEDIO	0.84	0.84	0.83	0.85	0.87	0.84
MINDO	0.82	0.81	0.80	0.73	0.80	0.77
OYACACHI	0.36	0.35	0.27	-0.11	0.08	-0.06
PAPALLACTA	0.23	0.19	0.17	-0.10	-0.06	-0.05
PISQUE	0.74	0.75	0.76	0.71	0.91	0.70
PITA	0.80	0.80	0.80	0.71	0.67	0.61
QUIJOS	0.79	0.72	0.68	-0.52	0.71	0.52
SAN PEDRO	0.82	0.83	0.82	0.82	0.88	0.80
TAMBOYACU	0.82	0.83	0.82	0.28	0.22	0.26
TOTAL	0.67	0.65	0.64	0.45	0.52	0.47

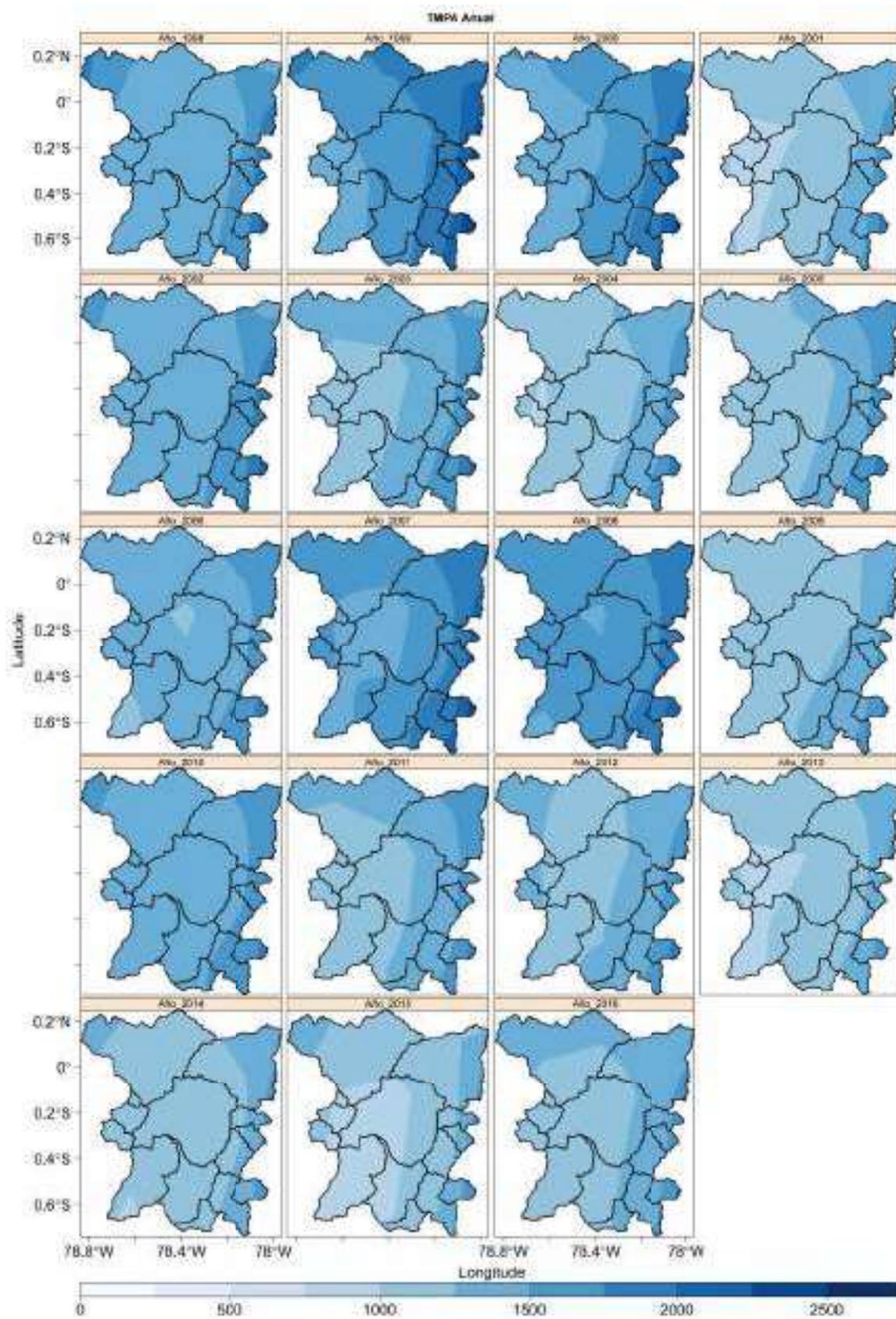
**Tabla A.13** Índice de concordancia (d) para los pluviómetros de las subcuencas y producto IMERG v3

METODO DE RELLENO	IDW	OK	SPLINE	Regresión Lineal Simple	Regresión Lineal IMERG	Regresión Lineal Múltiple
ANTISANA	0.50	0.51	0.53	0.28	0.49	0.27
CHALPI GRANDE	0.55	0.43	0.45	0.32	0.27	0.30
CINTO	0.88	0.86	0.87	0.86	0.87	0.81
GUAYLLABAMBA ALTO	0.70	0.67	0.67	0.63	0.61	0.57
GUAYLLABAMBA MEDIO	0.71	0.69	0.69	0.64	0.62	0.55
MINDO	0.86	0.87	0.87	0.75	0.74	0.76
OYACACHI	0.50	0.46	0.44	0.29	0.36	0.33
PAPALLACTA	0.46	0.41	0.41	0.29	0.31	0.27
PISQUE	0.44	0.45	0.46	0.41	0.53	0.43
PITA	0.82	0.82	0.82	0.75	0.60	0.61
QUIJOS	0.50	0.48	0.54	0.23	0.72	0.27
SAN PEDRO	0.87	0.86	0.86	0.84	0.84	0.81
TAMBOYACU	0.66	0.65	0.65	0.32	0.41	0.33
TOTAL	0.65	0.63	0.63	0.51	0.57	0.48

## **ANEXO 9**

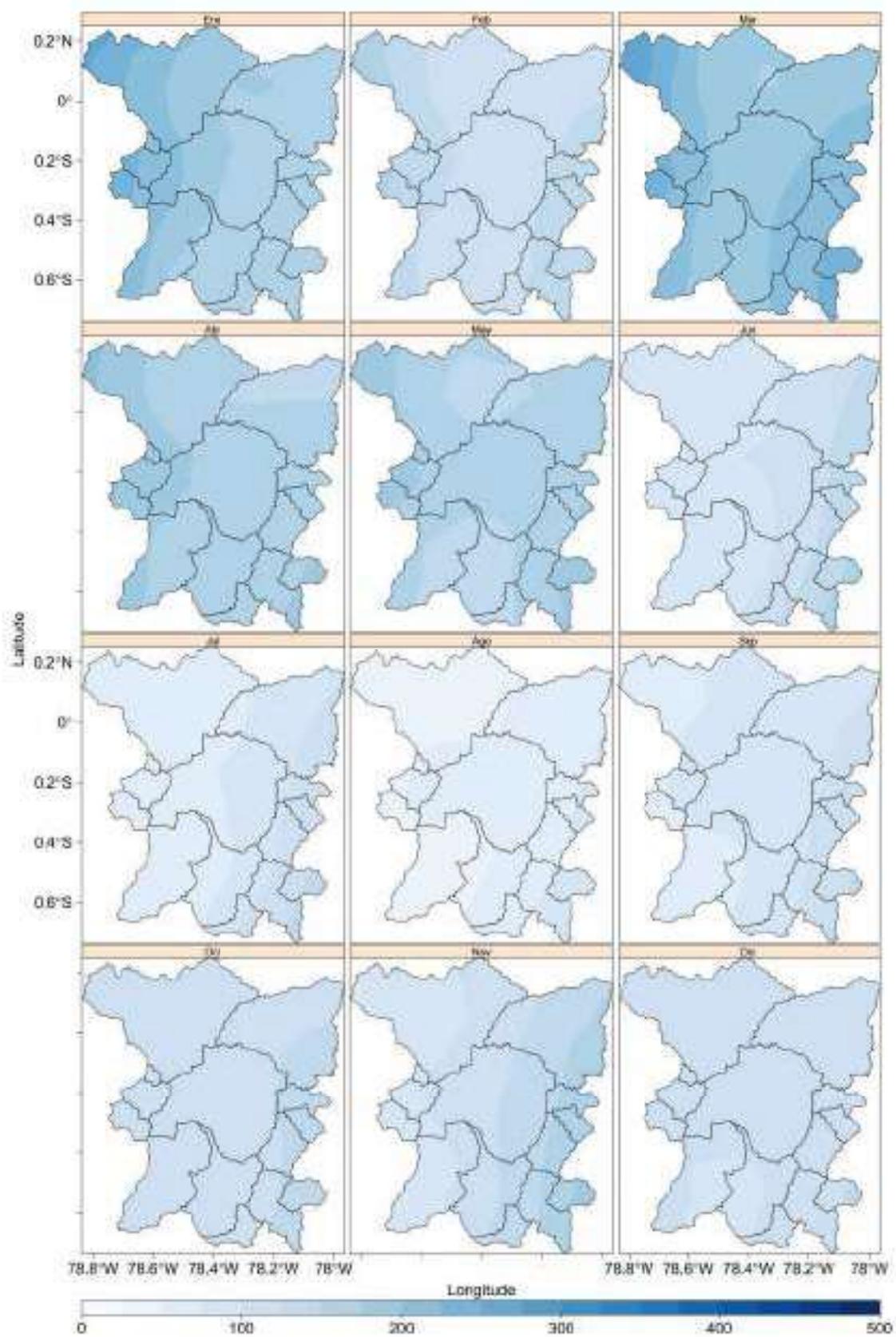
**Mapas de estimaciones satelitales TMPA v7 sin corregir**

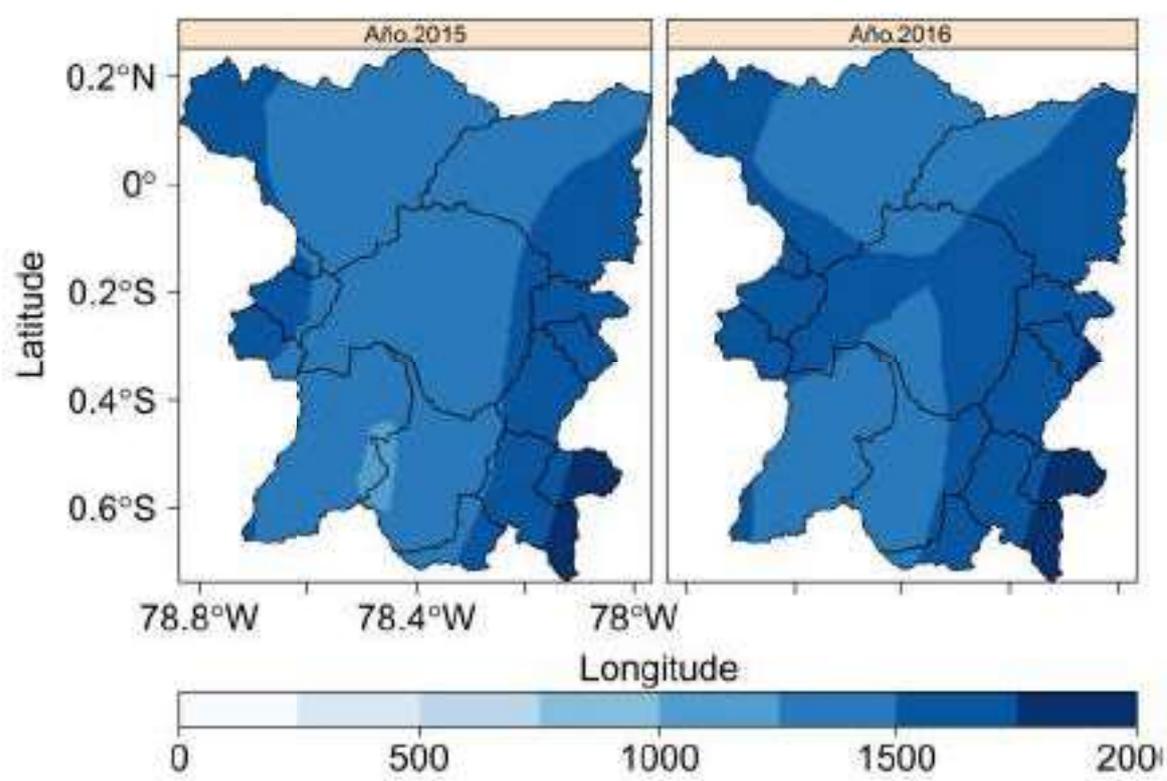




## **ANEXO 10**

**Mapas de estimaciones satelitales IMERG v3 sin corregir**

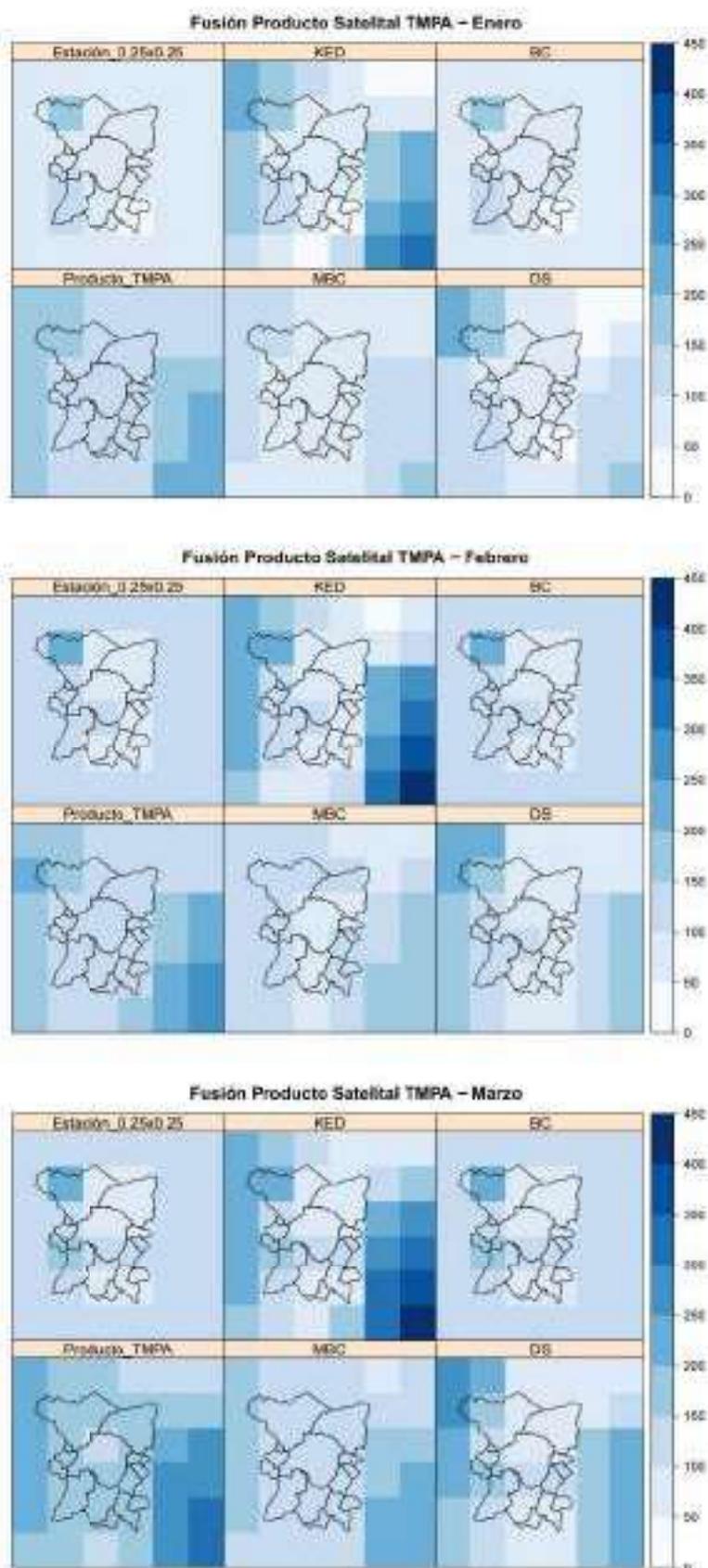




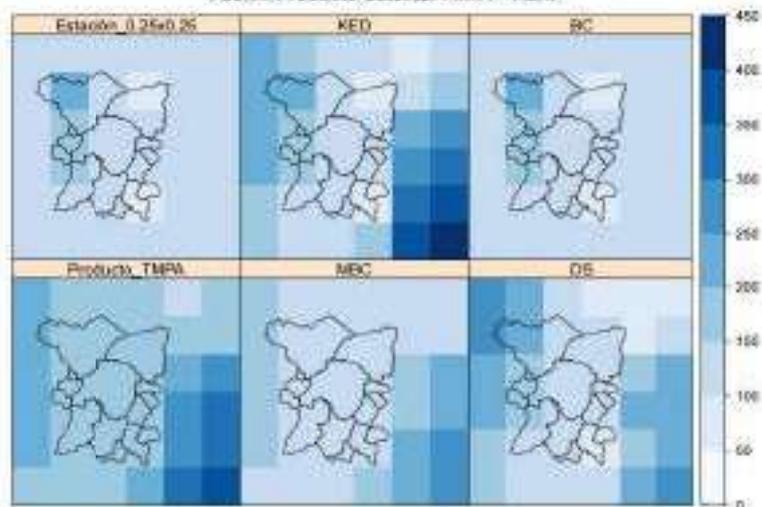
**ANEXO 11**

**Estimaciones satelitales mensuales multianuales TMPA v7  
corregidas**

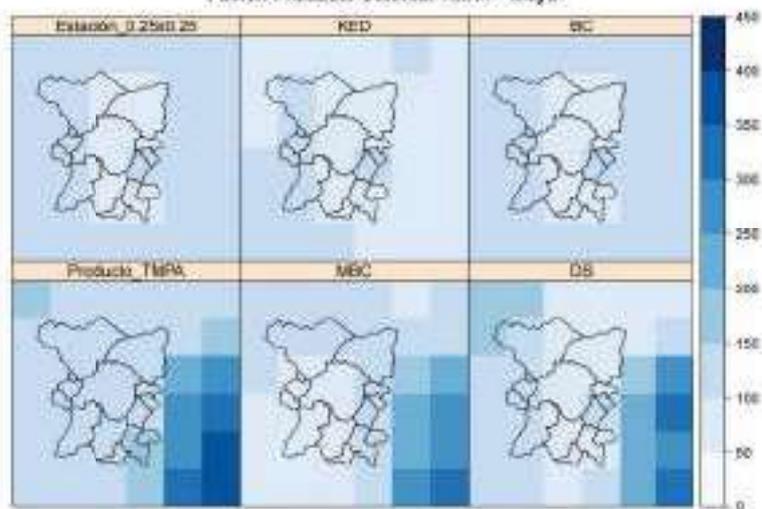
FIGURA 11.1: Producto Satelital TMPA v7 corregido - Base Relleno Regresión Lineal Simple



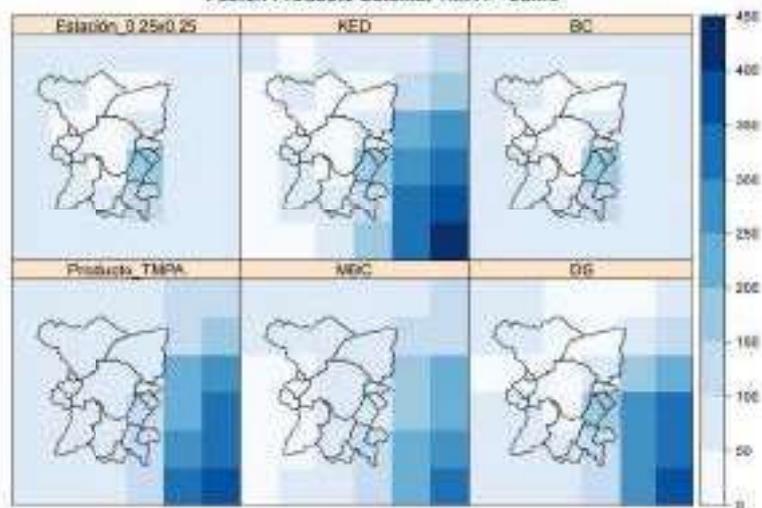
Fusión Producto Satelital TMPA - Abril



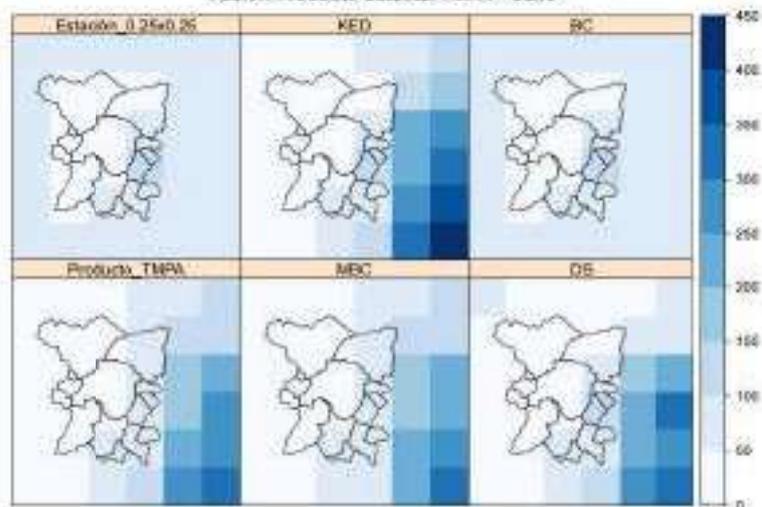
Fusión Producto Satelital TMPA - Mayo



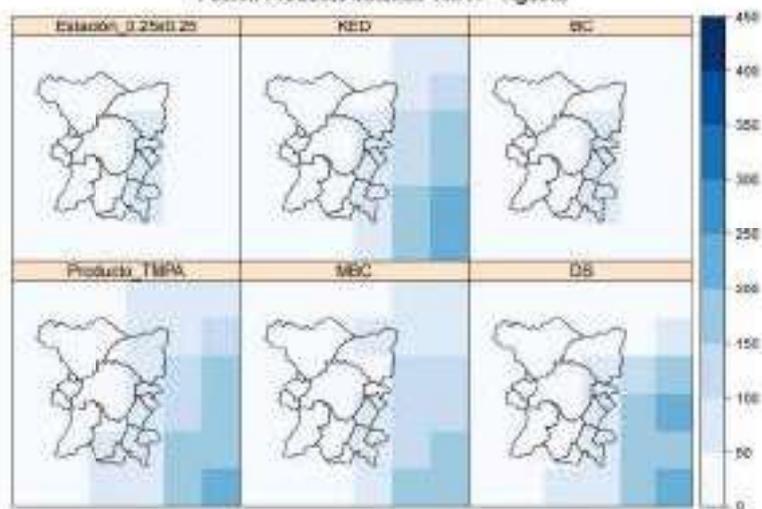
Fusión Producto Satelital TMPA - Junio



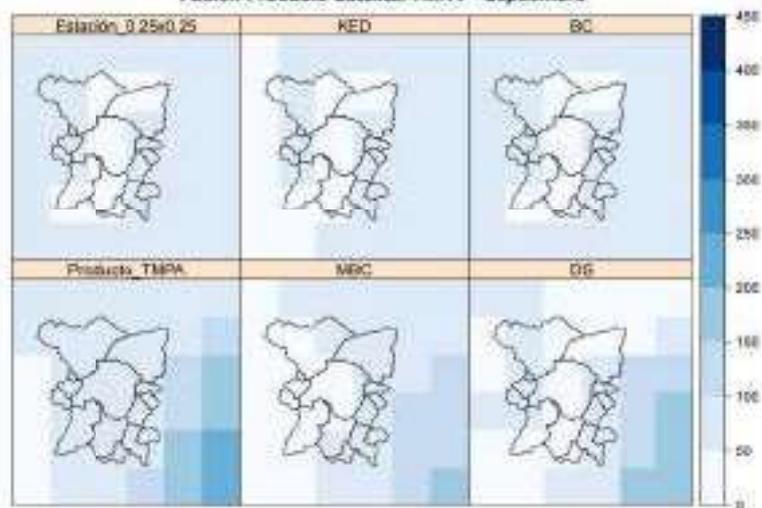
Fusión Producto Satelital TMPA - Julio



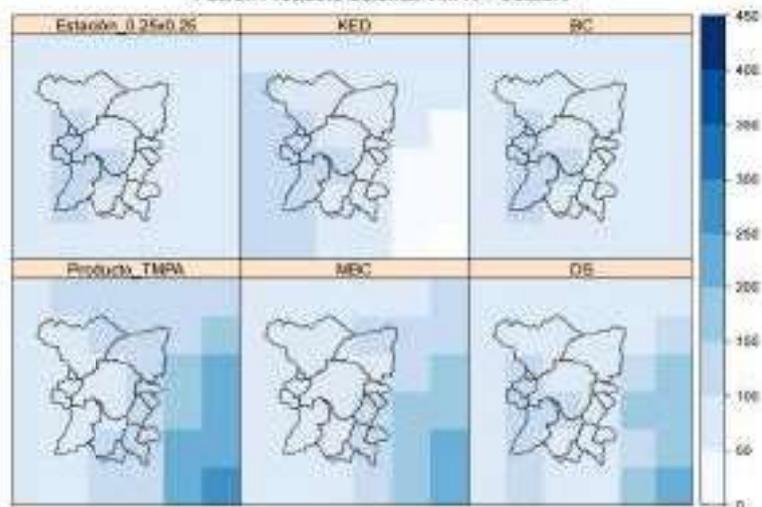
Fusión Producto Satelital TMPA - Agosto



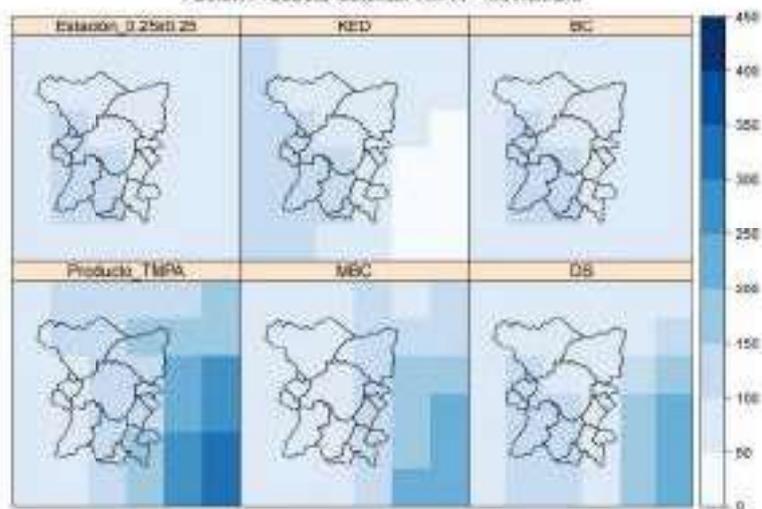
Fusión Producto Satelital TMPA - Septiembre



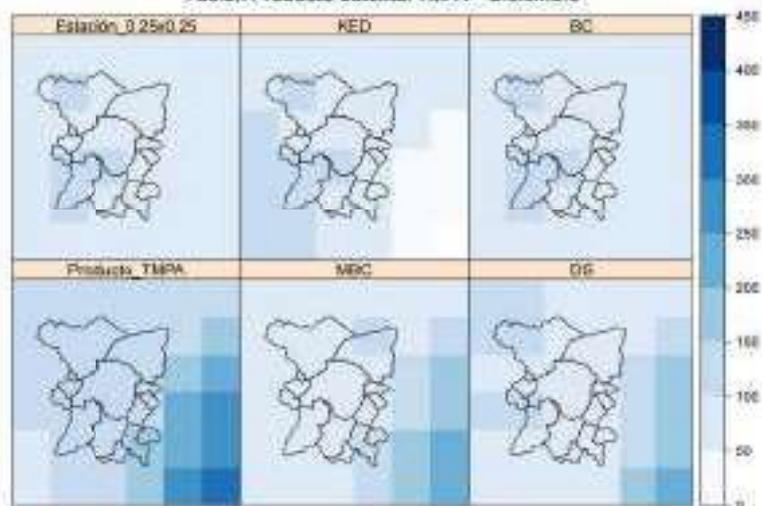
Fusión Producto Satelital TMPA – Octubre



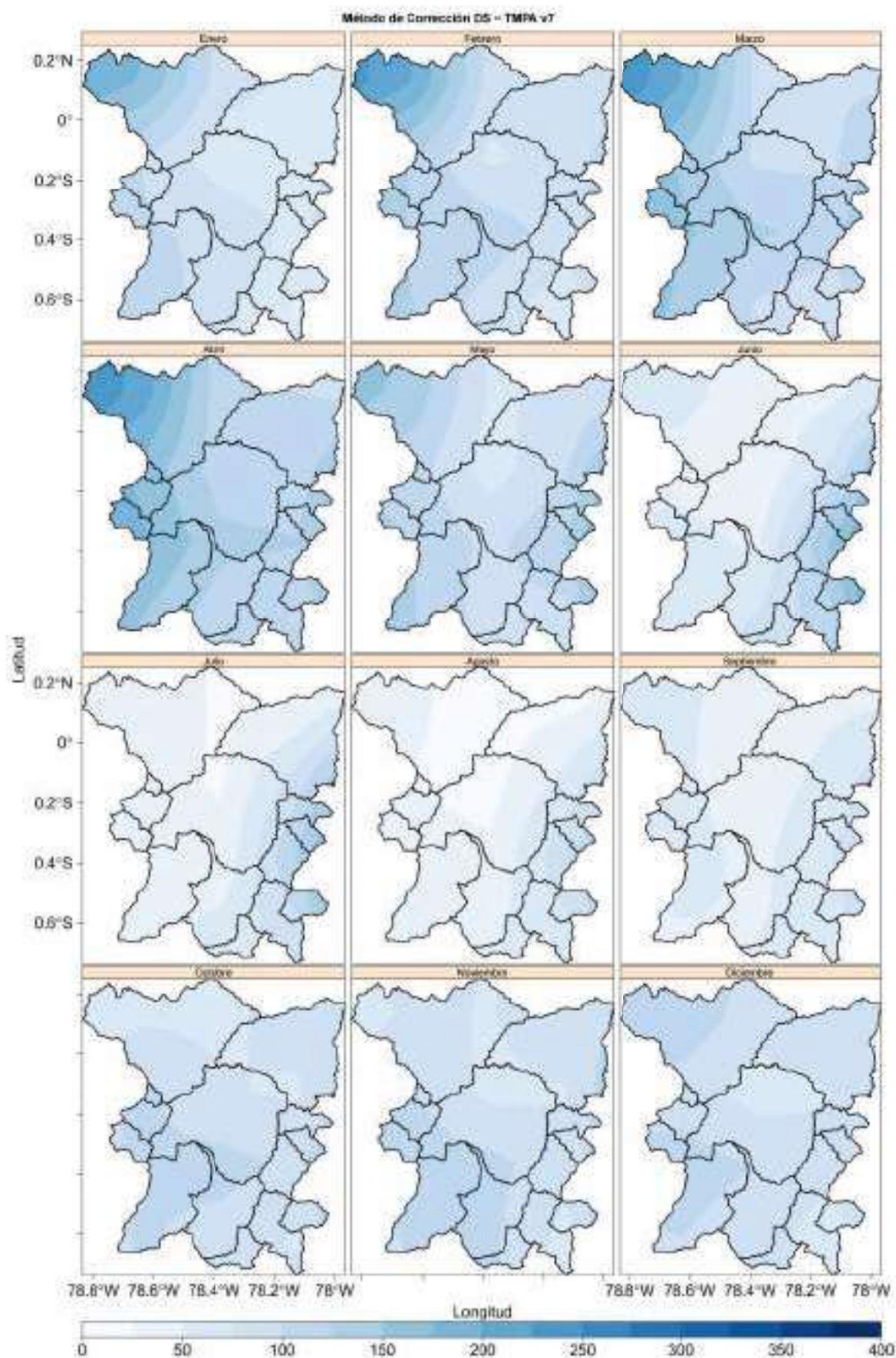
Fusión Producto Satelital TMPA – Noviembre

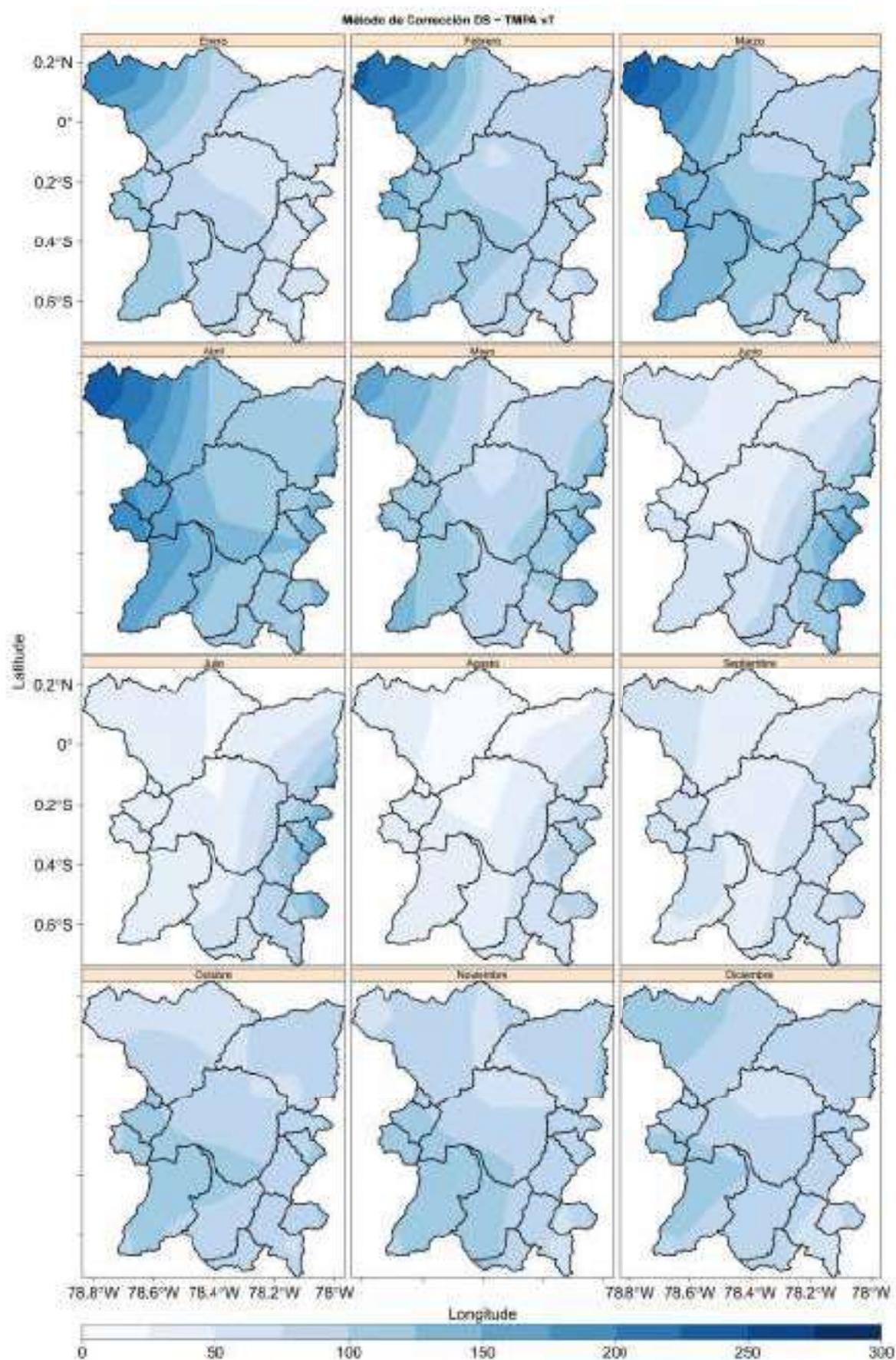


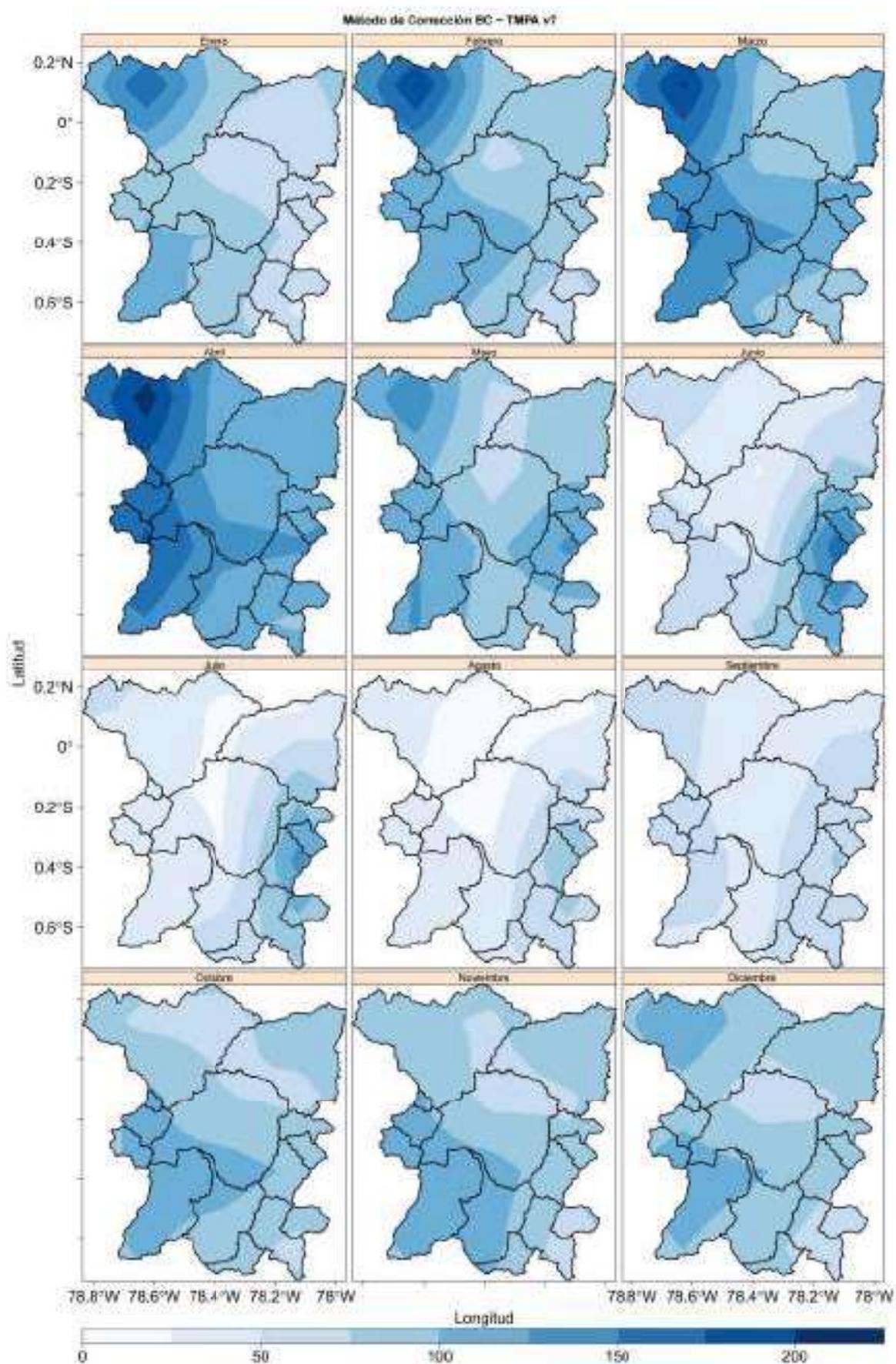
Fusión Producto Satelital TMPA – Diciembre

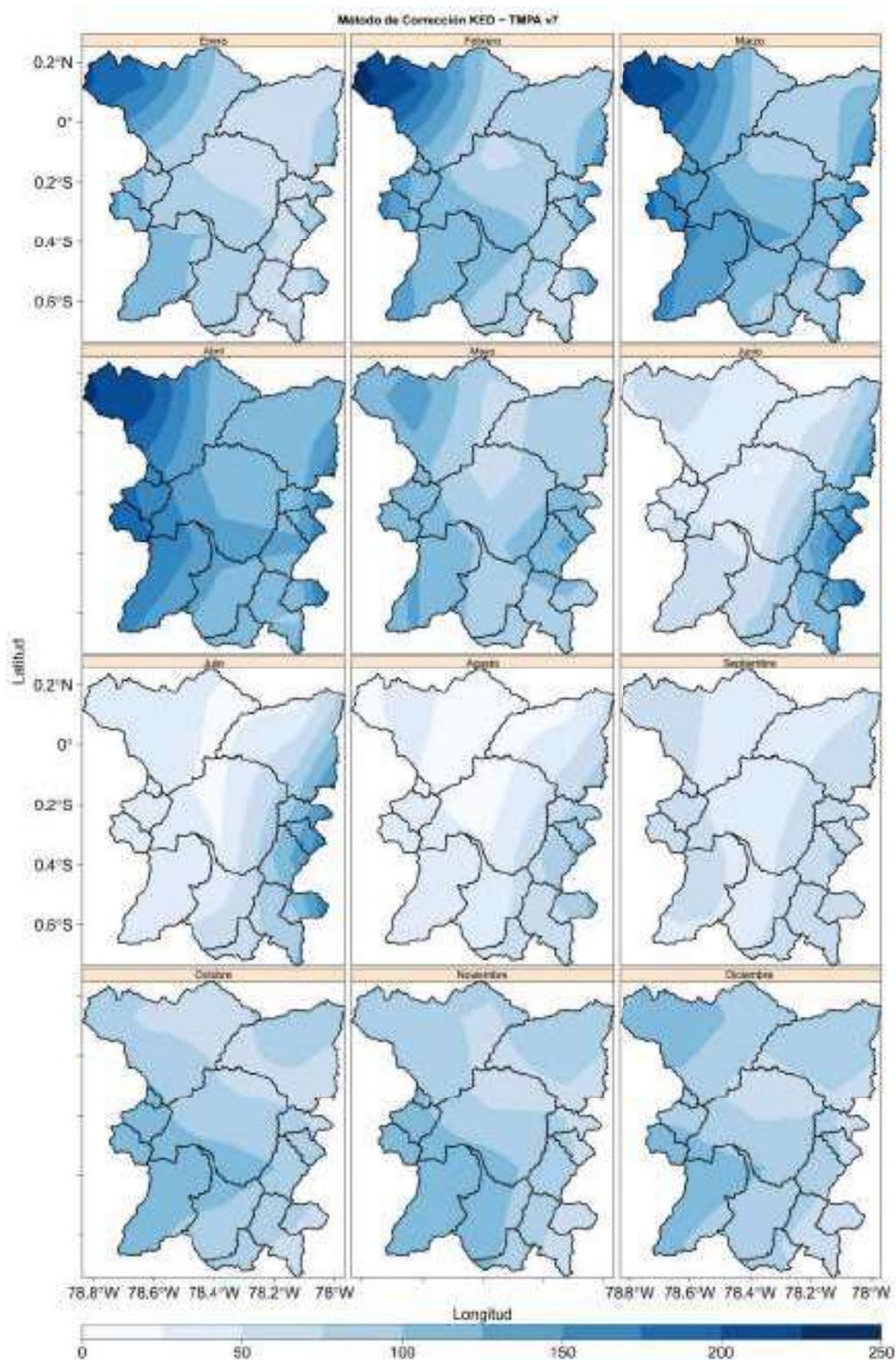


**FIGURA 11.2:** Producto Satelital TMPA v7 corregido - Mapa de Isoyetas de Precipitación Media Mensual Multianual





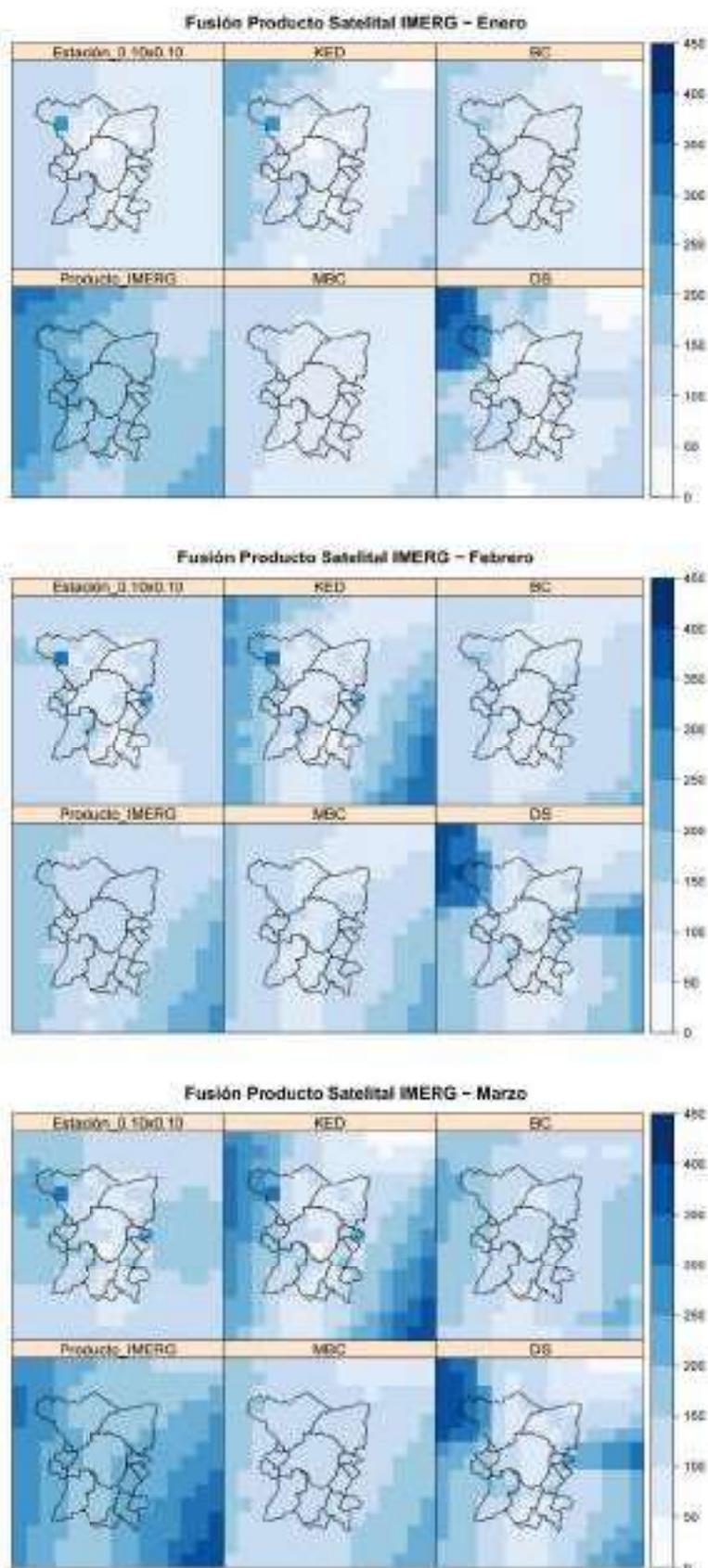




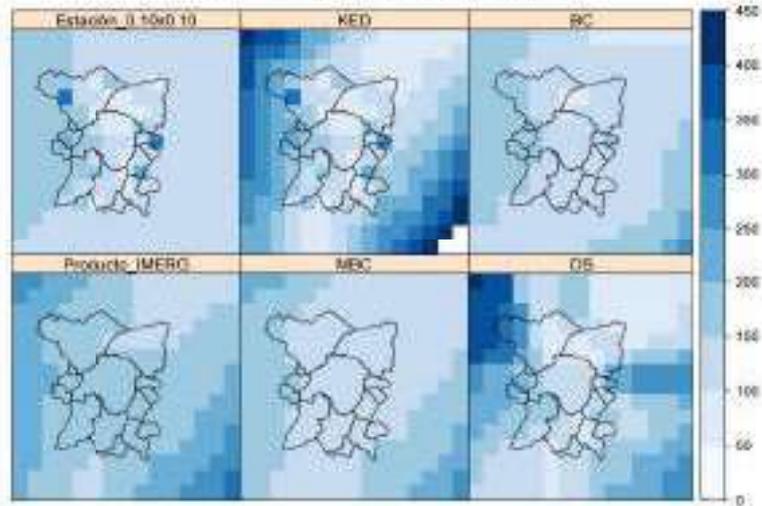
## **ANEXO 12**

**Estimaciones satelitales mensuales multianuales IMERG v3  
corregidas**

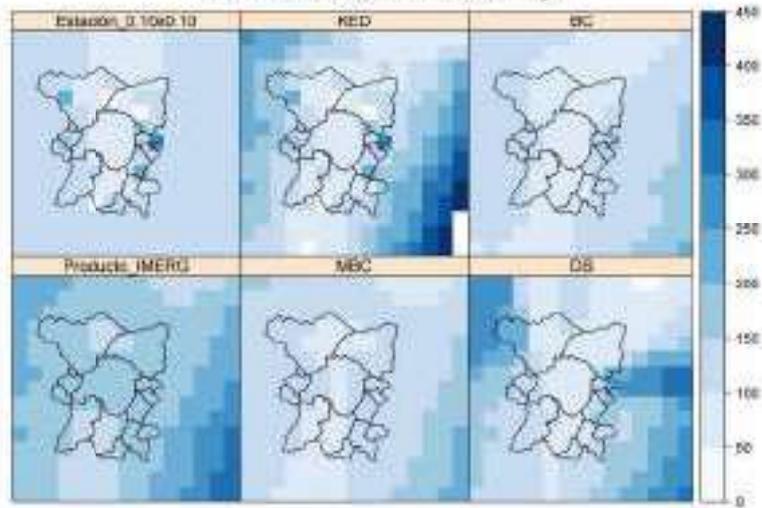
FIGURA 12.1: Producto Satelital IMERG v3 corregido - Base Relleno Regresión lineal Simple



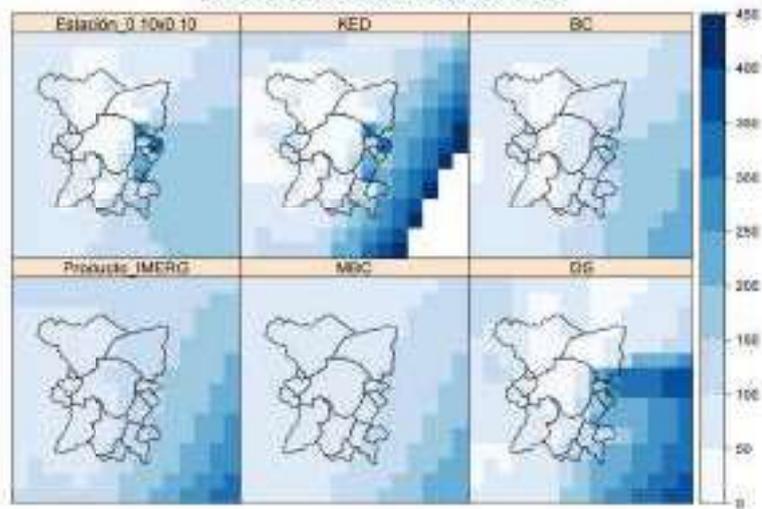
Fusión Producto Satelital MERG - Abril



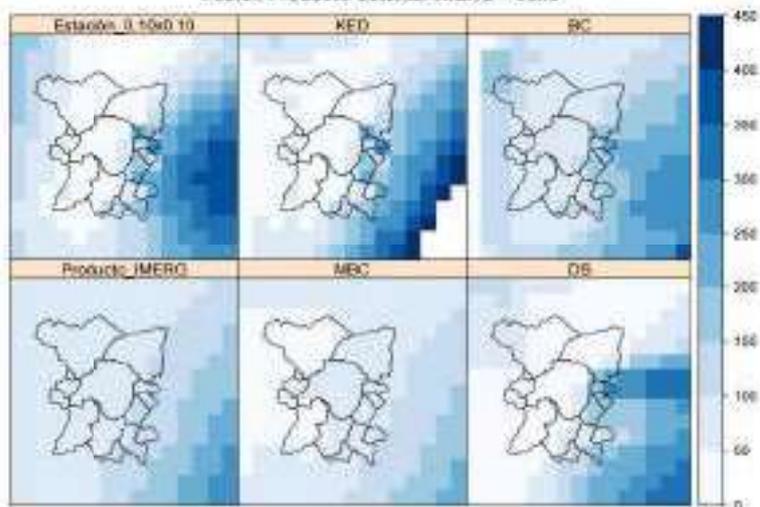
Fusión Producto Satelital MERG - Mayo



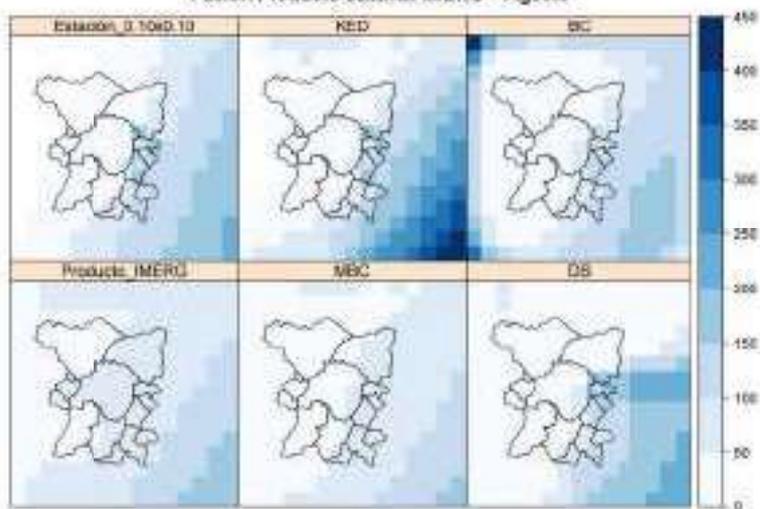
Fusión Producto Satelital MERG - Junio



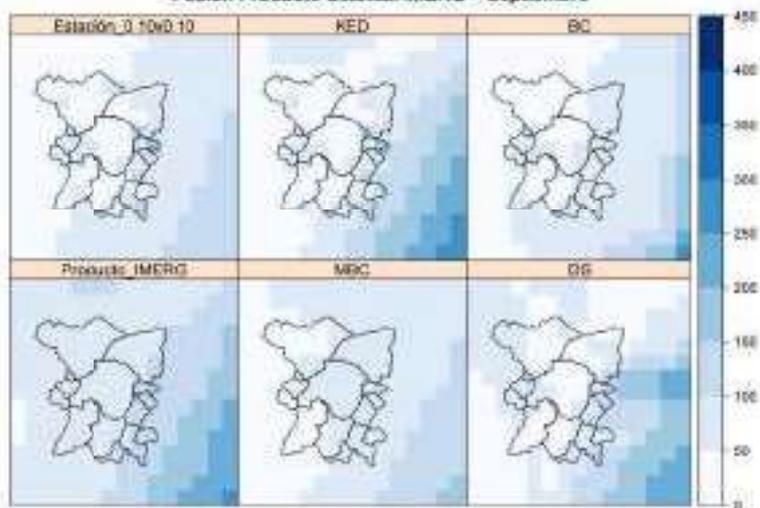
Fusión Producto Satelital MERG - Julio



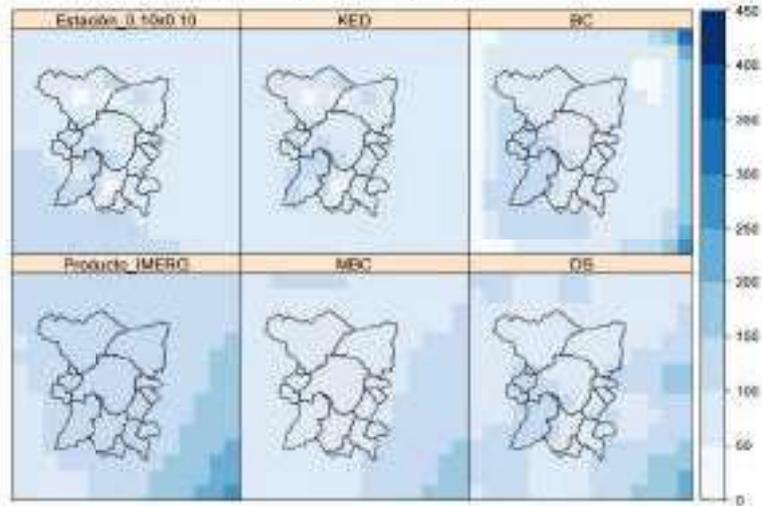
Fusión Producto Satelital MERG - Agosto



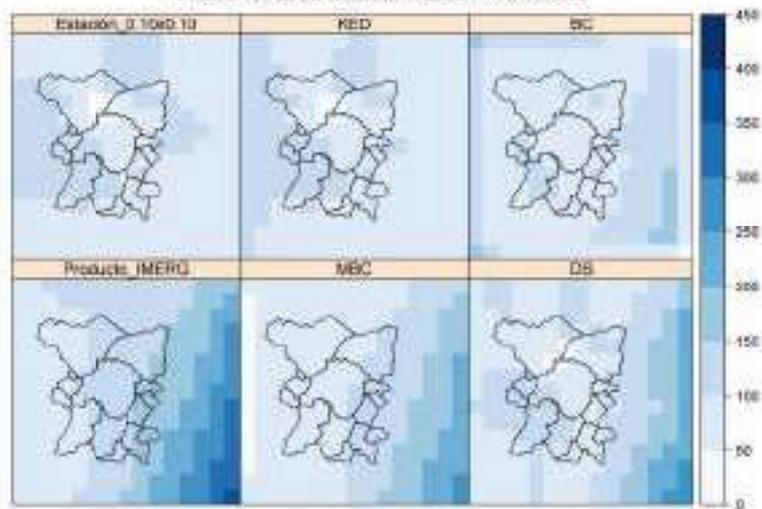
Fusión Producto Satelital MERG - Septiembre



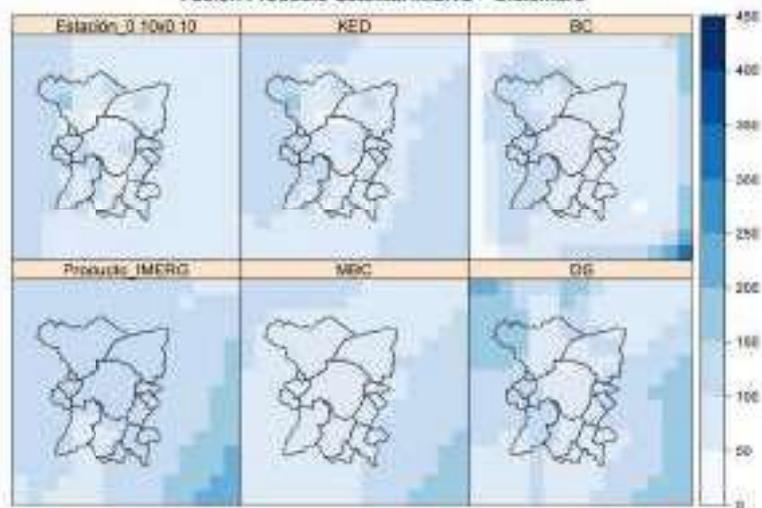
Fusión Producto Satelital IMERG - Octubre



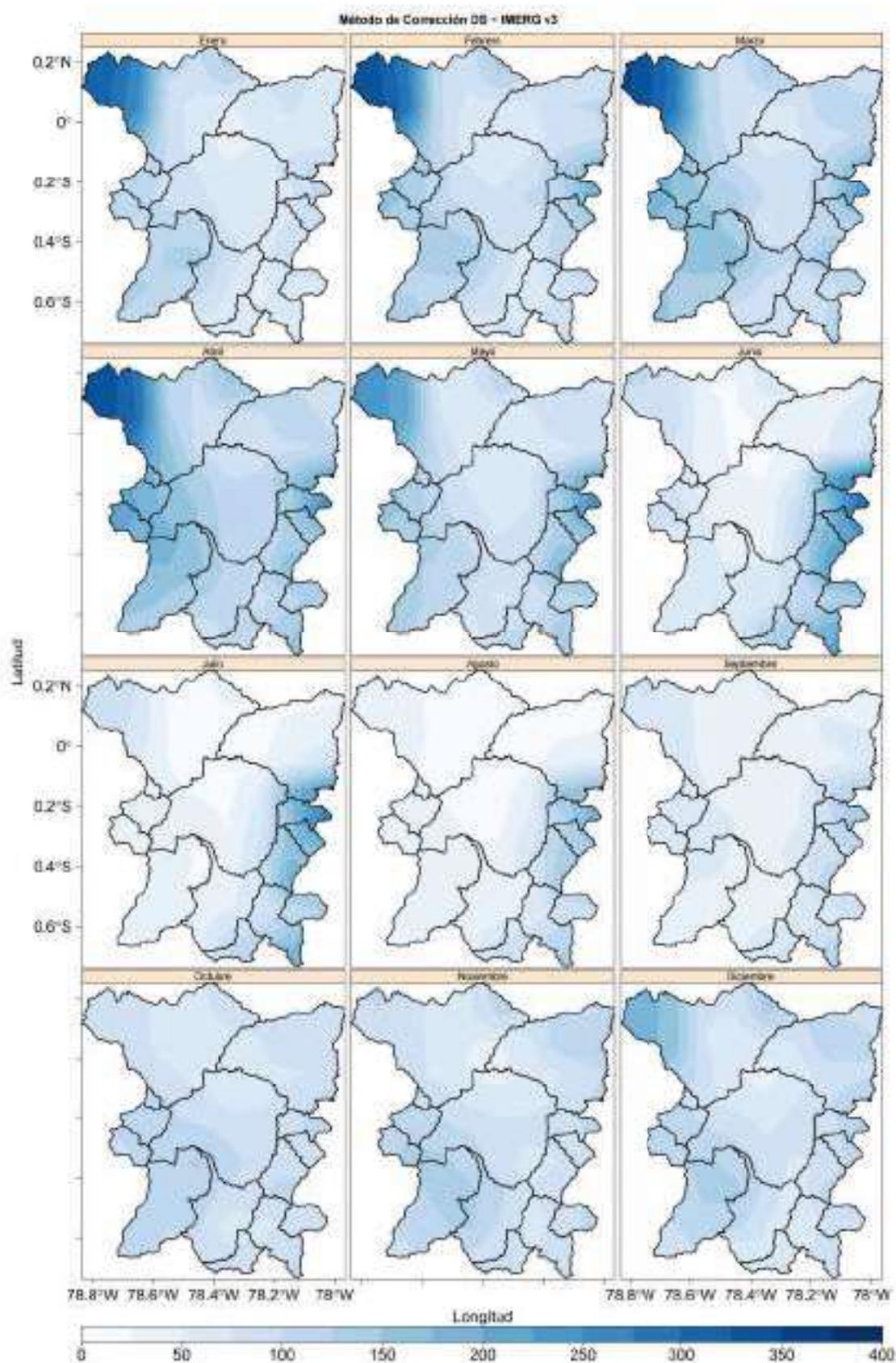
Fusión Producto Satelital IMERG - Noviembre

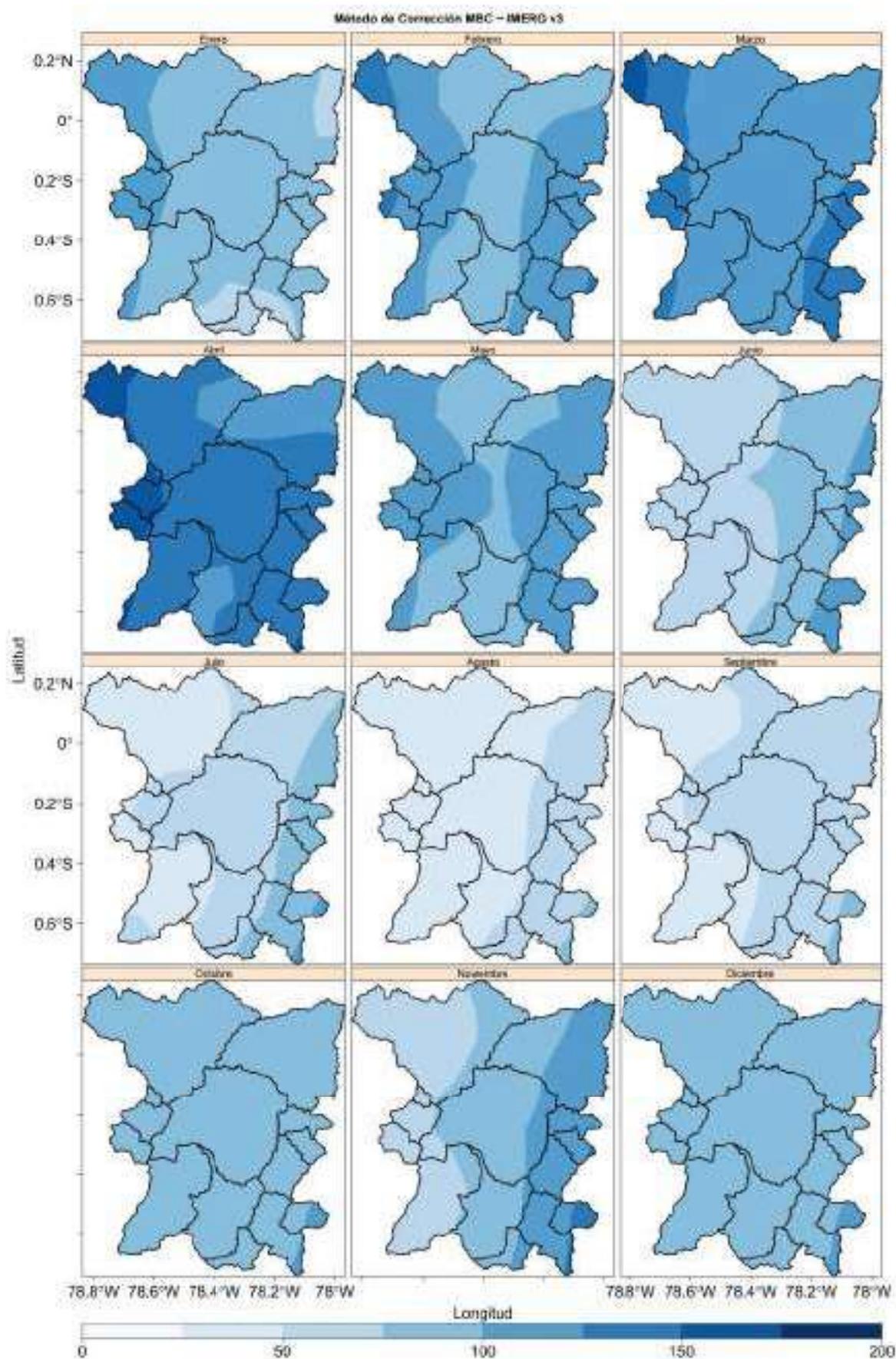


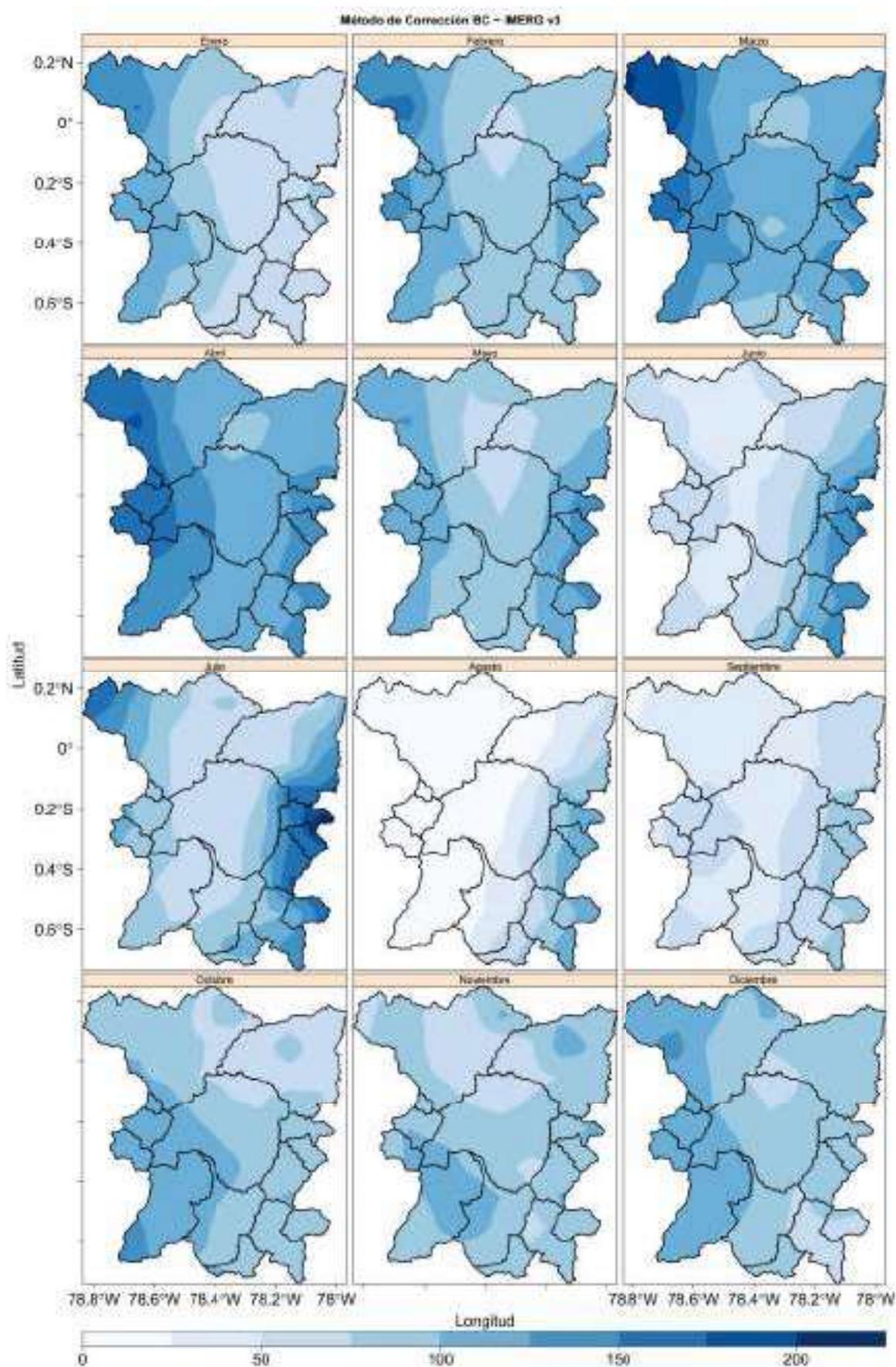
Fusión Producto Satelital IMERG - Diciembre

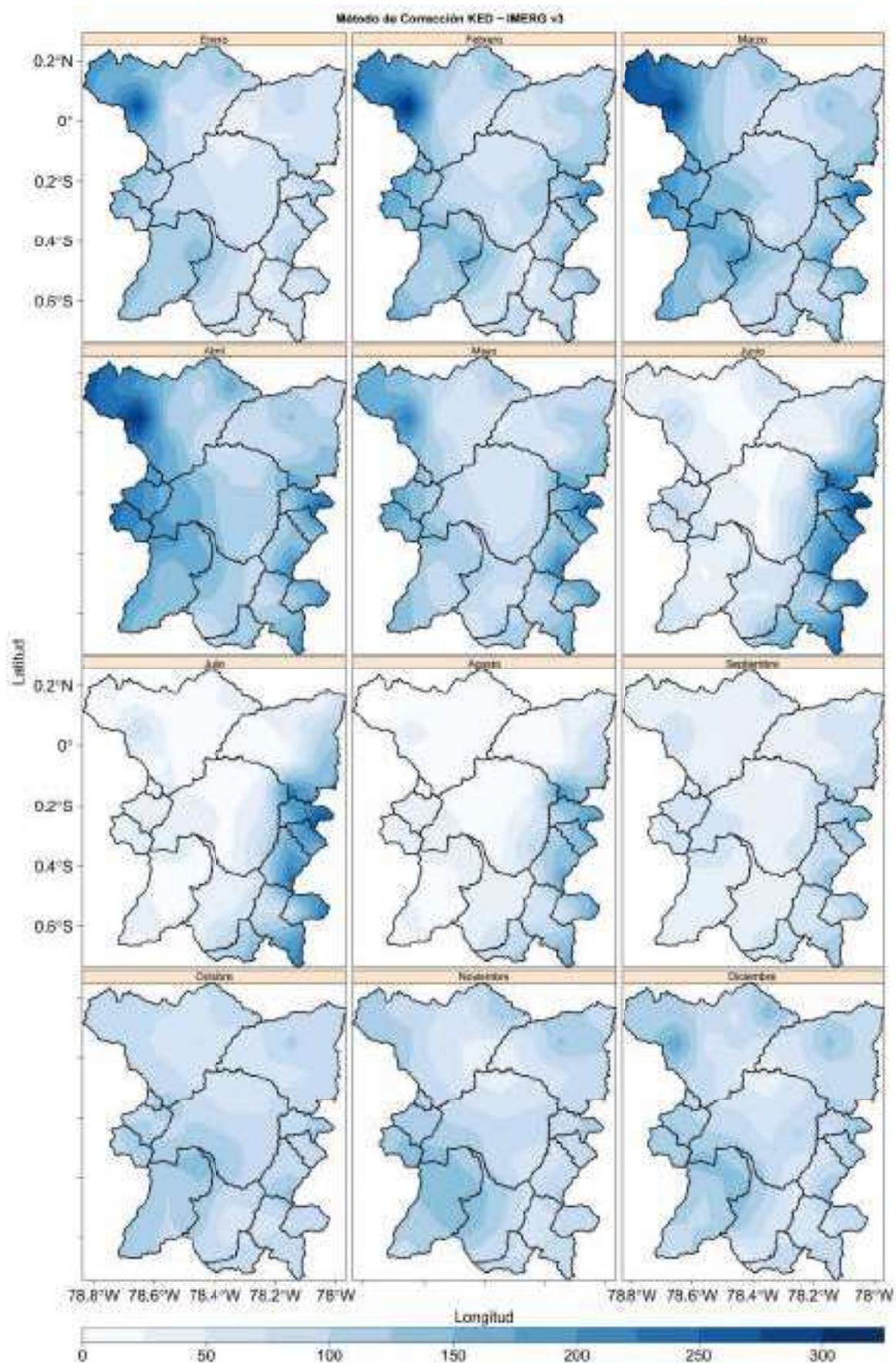


**FIGURA 12.2:** Producto Satelital IMERG v3 corregido - Mapa de Isoyetas de Precipitación Media Mensual Multianual





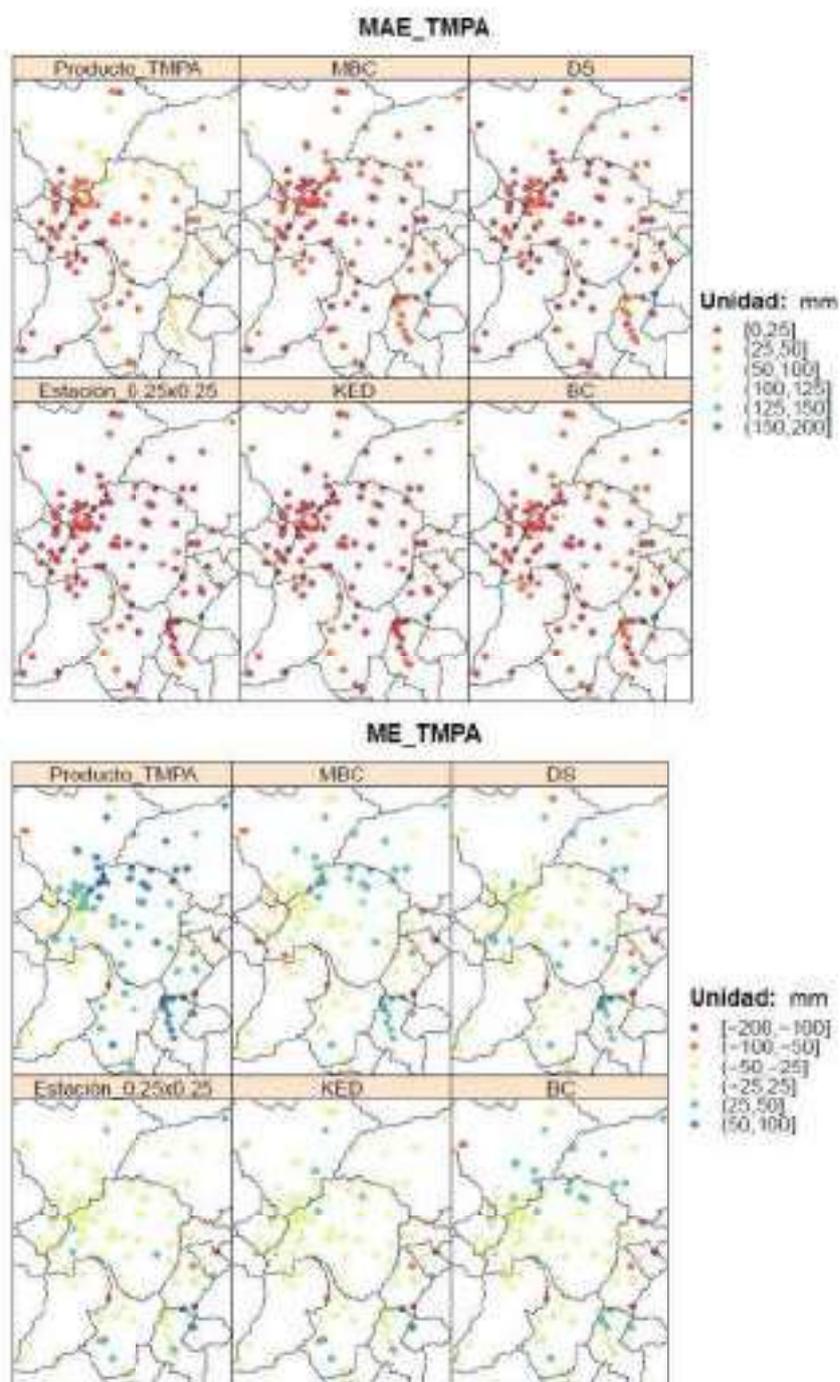




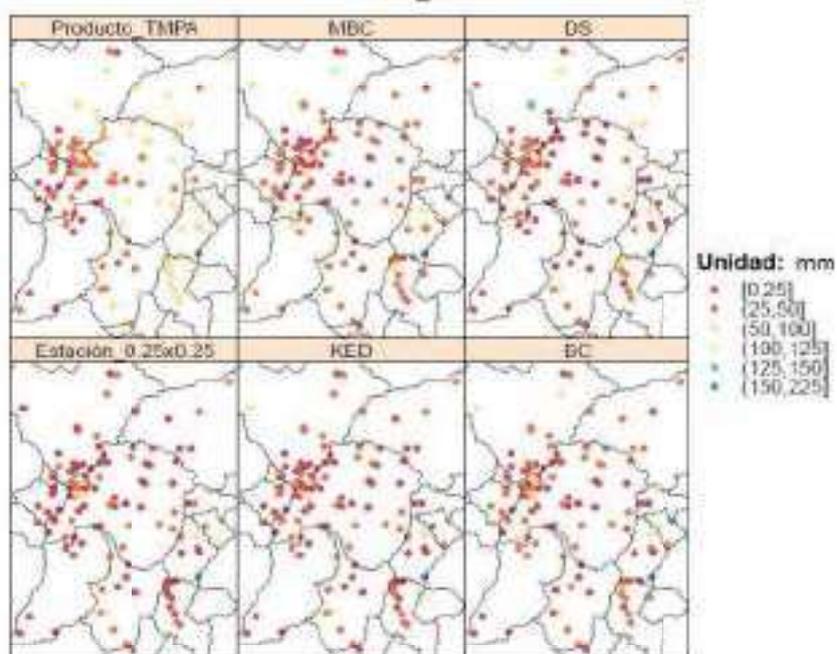
## **ANEXO 13**

**Validación Cruzada - Métodos de Corrección y observaciones  
campo**

FIGURA 13.1: Índices de la Validación Cruzada – Base Relleno Regresión Lineal Simple y TMPA v7



## RMSE\_TMPA



## r correlación TMPA

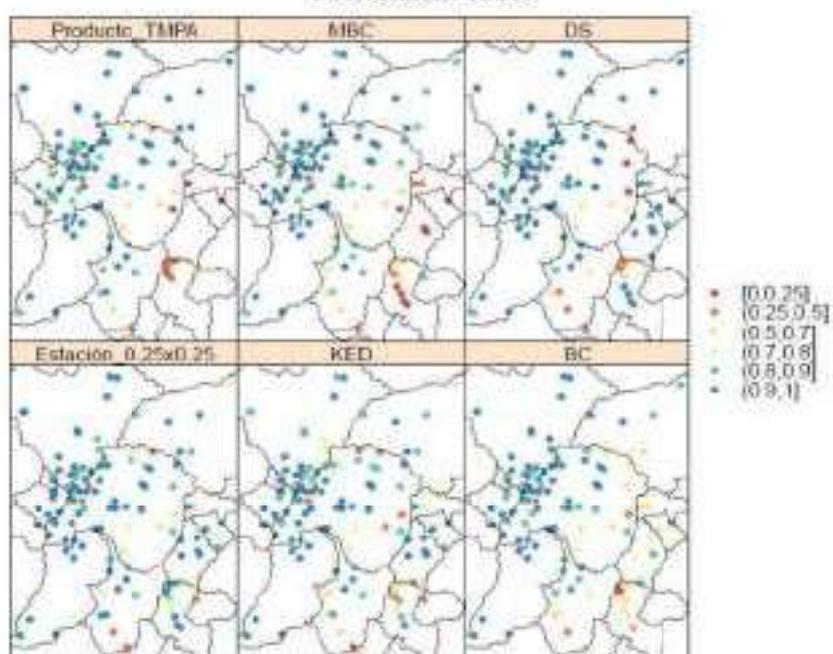
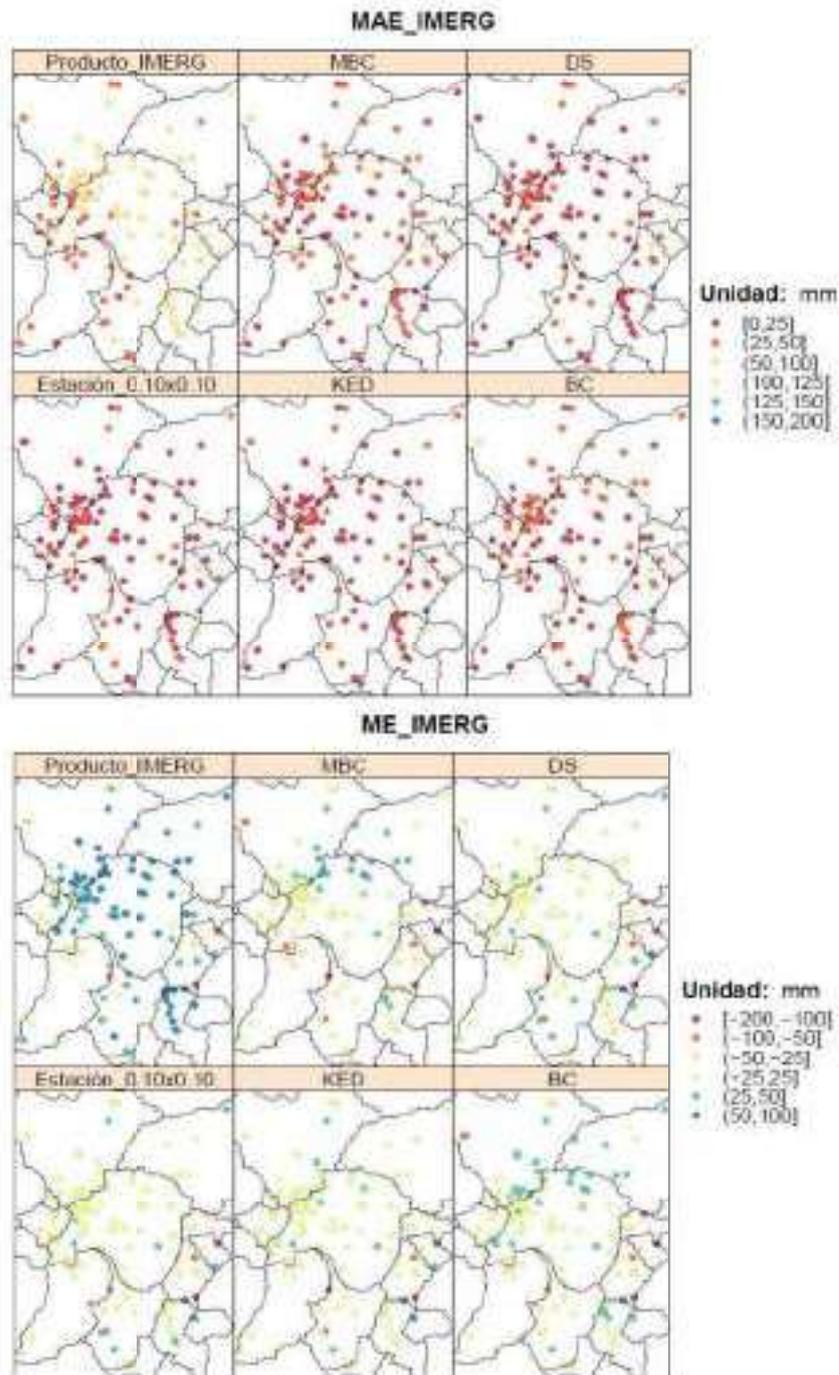
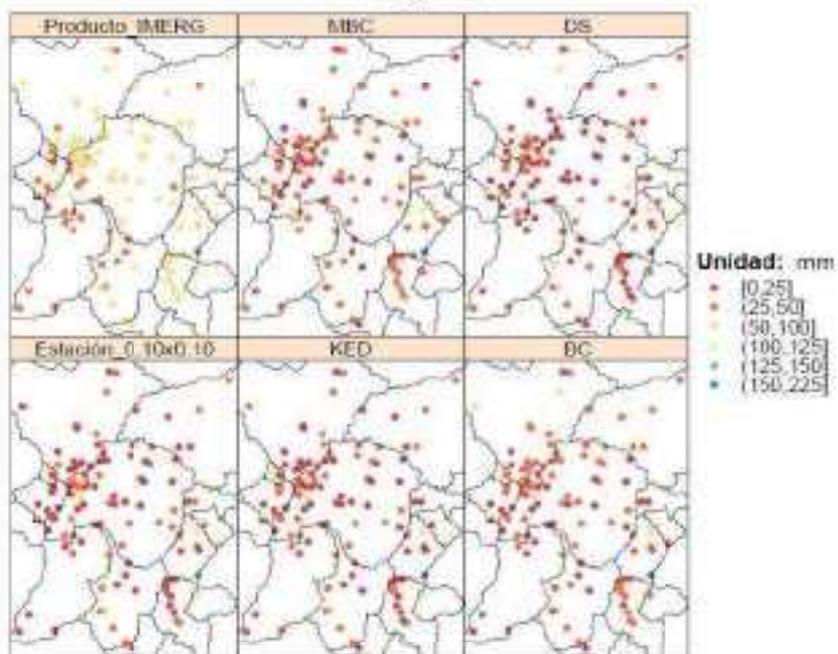


FIGURA 13.2: Índices de la Validación Cruzada - Base Relleno Regresión Lineal Simple e IMERG v3



## RMSE\_IMERG



## r correlación IMERG

