

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO
EN AIRE AMBIENTE EN LA ZONA CARBONÍFERA DEL DEPARTAMENTO
DEL CESAR Y SU INTERRELACIÓN CON LA METEOROLOGÍA

LUIS ALBERTO MORALES RINCÓN



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2012

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO
EN AIRE AMBIENTE EN LA ZONA CARBONÍFERA DEL DEPARTAMENTO
DEL CESAR Y SU INTERRELACIÓN CON LA METEOROLOGÍA

LUIS ALBERTO MORALES RINCÓN

Trabajo de aplicación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

Dirigido por:

RODRIGO JIMÉNEZ PIZARRO, Ph.D.

Profesor Asociado

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Universidad Nacional de Colombia – Bogotá



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la fortaleza brindada durante estos años, a Corpocesar por la confianza y la importante continuidad proporcionada al proyecto de operación de los sistemas de vigilancia del departamento del Cesar, al grupo de investigación en Geomática por su apoyo incondicional y a mi director por esa guía incansable ofrecida durante el desarrollo de este proyecto.

Realizo un reconocimiento muy especial a las personas que hacen parte del equipo técnico del Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar compuesto por miembros tanto de la UIS como de Corpocesar por su inagotable esfuerzo y dedicación que cada día hacen posible, visible y tangible este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	26
2. GENERALIDADES	27
2.1 Planteamiento del problema.....	27
2.2 Descripción de la zona de estudio.	31
2.3 Descripción de las operaciones mineras.....	34
2.4 Objetivo General	34
2.5 Objetivos Específicos.....	34
2.6 Estado del arte.....	35
2.7 Marco teórico	37
2.7.1 Evaluación de datos meteorológicos	37
2.7.2 Generalidades sobre contaminación atmosférica.....	37
3. METODOLOGÍA	47
3.1 Evaluación de datos existentes y selección de periodo de análisis	47
3.2 Caracterización de la variación espacial y temporal de las variables meteorológicas en la ZCC y establecimiento de relaciones entre estas.	51
3.2.1 Definición de periodos meteorológicos	51
3.2.2 Comportamiento horario de las variables meteorológicas durante los periodos meteorológicos.....	51
3.2.3 Comportamiento diario de las principales variables meteorológicas.....	52
3.3 Caracterización de la variación espacial y temporal de los niveles de material particulado PM ₁₀ y TSP en la ZCC y establecimiento de relaciones entre estos.	52
3.4 Asociación de sitios de medición de variables meteorológicas a estaciones de calidad de aire.....	53

3.4.1	<i>Distribución espacial de las estaciones de calidad del aire respecto a las estaciones meteorológicas y las principales fuentes.</i>	54
3.4.2	<i>Relación entre precipitación y concentración de PM en una combinación de estaciones de calidad de aire con estaciones meteorológicas</i>	54
3.4.3	<i>Relación de concentración con velocidad y dirección del viento</i>	55
3.5	Establecimiento de relaciones espaciales y temporales entre variables meteorológicas y niveles de material particulado	57
4.	RESULTADOS	58
4.1	Evaluación de datos existentes y selección de periodo de análisis	58
4.1.1	<i>Estructuración de una base de datos y evaluación de datos meteorológicos</i>	58
4.1.2	<i>Evaluación de datos meteorológicos</i>	60
4.1.3	<i>Selección de las estaciones e intervalos de tiempo a estudiar.</i>	69
4.2	Caracterización de la variación espacial y temporal de las variables meteorológicas en la ZCC y establecimiento de relaciones entre estas.	72
4.2.1	<i>Definición de periodos meteorológicos</i>	72
4.2.2	<i>Comportamiento horario de las variables meteorológicas durante los periodos meteorológicos.</i>	73
4.2.3	<i>Comportamiento diario de las principales variables meteorológicas.</i>	83
4.3	Caracterización de la variación espacial y temporal de los niveles de material particulado PM ₁₀ y TSP en la ZCC y establecimiento de relaciones entre estos.	85
4.3.1	<i>Comportamiento mensual de las concentraciones de TSP y PM₁₀</i>	85
4.3.2	<i>Relación entre PM₁₀ y TSP</i>	88
4.4	Asociación de sitios de medición de variables meteorológicas a estaciones de calidad de aire	92
4.4.1	<i>Distribución espacial de las estaciones de calidad del aire respecto a las estaciones meteorológicas y las principales fuentes de PM.</i>	94
4.4.2	<i>Relación entre precipitación y concentración de PM en una combinación de estaciones de calidad de aire con estaciones meteorológica.</i>	96
4.4.3	<i>Relación de concentración con velocidad y dirección del viento</i>	101
4.5	Establecimiento de relaciones espaciales y temporales entre variables meteorológicas y niveles de material particulado	107
4.5.1	<i>Correlación entre las estaciones de medición de calidad de aire</i>	107
4.5.2	<i>Relación entre concentración y radiación solar global.</i>	109

4.5.3	<i>Relación entre condiciones meteorológicas globales y concentración de PM</i>	112
5.	CONCLUSIONES	114
6.	RECOMENDACIONES.....	117
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	119
8.	ANEXOS.....	122

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Estaciones del SEVCA_ZCC.....	28
Tabla 2 Población proyectada a 2011 para los centros poblados más importantes de la zona céntrica del Cesar.....	33
Tabla 3 Fenómenos sinópticos en zonas tropicales.....	44
Tabla 4 Criterios para la evaluación de consistencia de datos meteorológicos ...	49
Tabla 5 Consolidación de información a mediciones horarias, diarias y mensuales.....	59
Tabla 6 Representatividad estaciones de calidad de aire	69
Tabla 7 Estaciones meteorológicas seleccionada.....	70
Tabla 8 Representatividad de estaciones meteorológicas	71
Tabla 9 Coeficiente de correlación para la relación $PM_{10} = a[TSP] + b$	89
Tabla 10 Distancias entre estaciones de calidad de aire y estaciones meteorológicas (en km).....	94
Tabla 11 Distancias entre estaciones de calidad de aire y fuentes de PM (en km)	96
Tabla 12 Parámetros de ajuste del modelo matemáticos para PM_{10}	97
Tabla 13 Parámetros de ajuste del modelo matemático para TSP	97
Tabla 14 Parámetros del modelo de deposición húmeda (PM_{10})	101
Tabla 15 Parámetros del modelo de deposición húmeda (TSP)	101
Tabla 16 Asignación de estación meteorológica a las estaciones de calidad de aire y distancias entre estas en Km	104
Tabla 17 Intervalos de ángulos de incidencia de las fuentes respecto a las estaciones de calidad de aire y dirección de las mayores concentraciones.	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de estaciones	29
Figura 2 Principales rasgos geográficos de la ZCC	32
Figura 3 Mapa Político de la ZCC	33
Figura 4 Rango de partículas según su tamaño.....	38
Figura 5 Vientos anabáticos (ascendentes) y catabáticos (descendentes).....	41
Figura 6 Comportamiento de los vientos durante el día debido a efecto térmico	42
Figura 7 Formación de la zona de confluencia inter tropical – celda Hadley.....	43
Figura 8 Posición de la ZCIT durante el año	44
Figura 9 Estructura de la tropósfera	45
Figura 10 Categorías de estabilidad atmosférica (USEPA, 2005).....	46
Figura 11 Modelo conceptual para la evaluación de datos meteorológicos	48
Figura 12 Modelo lógico de la base de datos.....	58
Figura 13 Evaluación visual de datos e identificación de datos sospechosos estación Borrego	62
Figura 14 Tabla consolidada con información meteorológica horaria y banderas para las variables analizadas.....	63
Figura 15 Bandera unificada - evaluación final del conjunto de datos	64
Figura 16 Comportamiento promedio mensual por horas para algunas variables meteorológicas.....	65
Figura 17 Campaña de intercomparación de piranómetros estación La Francia IDEAM.....	66
Figura 18 Intercomparación de sensores de radiación solar.....	67
Figura 19 Ecuación de equivalencia para la corrección de radiación solar estación La Francia IDEAM.....	67
Figura 20 Número de datos por variable para las estaciones representativas	68
Figura 21 Porcentaje de datos por variable para las estaciones representativas	68
Figura 22 Series de tiempo de precipitación (mm).....	72
Figura 23 Comportamiento de ENSO. NOAA, 2012.	73
Figura 24 Precipitación acumulada mensual (promedio multianual de la zona, 2009-2011).....	73

Figura 25 Diagrama de cajas estación Borrego	75
Figura 26 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Borrego	76
Figura 27 Rosa de probabilidad por periodo	77
Figura 28 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Borrego ...	78
Figura 29 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Borrego	78
Figura 30 Comportamiento de los vientos durante el día Estación Borrego.....	81
Figura 31 Calendario meteorológico para la estación Borrego año 2010.....	84
Figura 32 Comportamiento mensual de las concentraciones de PM ₁₀ (µg/m ³) estación ZM1 La Loma Centro 2009-2011	85
Figura 33 Comportamiento promedio mensual de las concentraciones de PM ₁₀ (µg/m ³) estación ZM1 La Loma Centro	85
Figura 34 Promedios móviles trimestrales de TSP (µg/m ³) estaciones de fondo. 86	
Figura 35 Promedios móviles trimestrales de PM ₁₀ (µg/m ³) estaciones de fondo	87
Figura 36 Promedios móviles trimestrales de PM ₁₀ (µg/m ³) efecto de tráfico	88
Figura 37 Promedios móviles trimestrales de TSP (µg/m ³) efecto de tráfico	88
Figura 38 Elementos de las gráficas PM ₁₀ – TSP	90
Figura 39 Relación PM ₁₀ - TSP para cada periodo estación ZM1, ZM2.....	90
Figura 40 Relación PM ₁₀ - TSP para cada periodo por estación de calidad de aire (ZM3, ZM5, ZM12 y ZM13)	91
Figura 41 Relación PM ₁₀ - TSP para cada periodo por estación de calidad de aire (ZM6, ZM7 y ZM9)	92
Figura 42 Cartografía de la ZCC actualizada a 2011, SEVCA_ZCC.....	93
Figura 43 Mapa de las distancias entre estaciones de calidad de aire y estaciones meteorológicas.....	94
Figura 44 Distancias entre estaciones de calidad de aire y fuentes.....	95
Figura 45 Concentración promedio mensual vs. precipitación acumulada mensual y promedios sectorizados.	98
Figura 46 Concentración promedio mensual y numero de días con precipitación en el mes y promedios sectorizados	99
Figura 47 Modelo de deposición húmeda estación ZM7 para la variable PM ₁₀ ..	100

Figura 48 Medición de los ángulos de incidencia de las fuentes respecto a las estaciones de calidad de aire.....	102
Figura 49 Comparación entre promedios vectoriales y promedios vectoriales ponderados	103
Figura 50 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1 con meteorología de Borrego.....	104
Figura 51 Direcciones de máximas y mínimas concentraciones	106
Figura 52 Calendarios de concentración para la estación ZM3 La Loma 2 - PM ₁₀	107
Figura 53 Gráficos de correlación entre estaciones de TSP	109
Figura 54 Serie de tiempo de la radiación solar global horaria (w/m ²)	109
Figura 55 Máximo diario de la radiación solar global horaria promedio (w/m ²).....	110
Figura 56 Registro fotográfico de material particulado suspendido en la ZCC, enero y febrero de 2012.....	111
Figura 57 Relación entre radiación solar y concentración de PM ₁₀	112
Figura 58 promedio trimestral móvil para las estaciones de fondo PM ₁₀ y ONI .	113
Figura 59 Precipitación horaria estación Borrego [mm].....	122
Figura 60 Radiación solar global horaria estación Borrego [w/m ²].....	122
Figura 61 Radiación solar máxima horaria estación Borrego [w/m ²].....	122
Figura 62 Temperatura promedio horaria estación Borrego [°C].....	123
Figura 63 Temperatura máxima horaria estación Borrego [°C]	123
Figura 64 Temperatura mínima horaria estación Borrego [°C].....	123
Figura 65 Humedad relativa horaria estación Borrego [%].....	123
Figura 66 Velocidad del viento horaria estación Borrego [m/s]	124
Figura 67 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Borrego [mm]	124
Figura 68 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Borrego (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]	124
Figura 69 Diagrama de cajas radiación solar global estación Borrego [w/m ²]....	125
Figura -70 Diagrama de cajas temperatura estación Borrego [°C].....	125
Figura 71 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Borrego [m/s]	125
Figura -72 Rosa de vientos total por periodo estación Borrego	126

Figura 73 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Borrego	126
Figura 74 Rosas de viento por horas periodo 1 estación Borrego	127
Figura -75 Rosas de viento por horas periodo 2 estación Borrego	127
Figura -76 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Borrego	128
Figura 77 Rosas de viento periodo 4 estación Borrego.....	128
Figura 78 Rosa de frecuencia total por periodos estación Borrego.....	129
Figura 79 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo Estación Borrego	129
Figura 80 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Borrego .	130
Figura 81 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Borrego	130
Figura 82 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Borrego	131
Figura 83 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación Borrego	131
Figura 84 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Borrego	132
Figura 85 Precipitación horaria estación Cerrolargo [mm]	132
Figura 86 Radiación solar global horaria estación Cerrolargo [w/m^2].....	133
Figura 87 Radiación solar máxima horaria estación Cerrolargo [w/m^2].....	133
Figura 88 Temperatura promedio horaria estación Cerrolargo [$^{\circ}C$]	133
Figura 89 Temperatura máxima horaria estación Cerrolargo [$^{\circ}C$].....	133
Figura -90 Temperatura mínima horaria estación Cerrolargo [$^{\circ}C$]	134
Figura 91 Humedad relativa horaria estación Cerrolargo [%].....	134
Figura 92 Velocidad del viento horaria estación Cerrolargo [m/s]	134
Figura 93 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Cerrolargo [mm] ...	135
Figura 94 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Cerrolargo (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]	135
Figura 95 Diagrama de cajas radiación solar global estación Cerrolargo [w/m^2] 135	
Figura 96 Diagrama de cajas temperatura estación Cerrolargo [$^{\circ}C$].....	136
Figura 97 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Cerrolargo [m/s]....	136
Figura 98 Rosa de vientos total por periodo estación Cerrolargo	136
Figura 99 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Cerrolargo..	137
Figura 100 Rosas de viento por horas periodo 1 estación Cerrolargo	138
Figura 101 Rosas de viento por horas periodo 2 estación Cerrolargo	138
Figura 102 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Cerrolargo	139

Figura 103 Rosas de viento periodo 4 estación Cerrolargo	139
Figura 104 Rosa de frecuencia total por periodos estación Cerrolargo	140
Figura 105 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Cerrolargo	140
Figura 106 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Cerrolargo	141
Figura 107 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Cerrolargo	141
Figura 108 Precipitación horaria estación Descanso [mm]	142
Figura 109 Radiación solar global horaria estación Descanso [w/m^2].....	142
Figura 110 Radiación solar máxima horaria estación Descanso [w/m^2].....	142
Figura 111 Temperatura promedio horaria estación Descanso [$^{\circ}C$]	142
Figura 112 Temperatura máxima horaria estación Descanso [$^{\circ}C$].....	143
Figura 113 Temperatura mínima horaria estación Descanso [$^{\circ}C$].....	143
Figura 114 Humedad relativa horaria estación Descanso [%].....	143
Figura 115 Velocidad del viento horaria estación Descanso [m/s]	143
Figura 116 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Descanso [mm]..	144
Figura 117 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Descanso (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]	144
Figura 118 Diagrama de cajas radiación solar global estación Descanso [w/m^2]	144
Figura 119 Diagrama de cajas temperatura estación Descanso [$^{\circ}C$].....	144
Figura 120 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Descanso [m/s] ...	145
Figura 121 Rosa de vientos total por periodo estación Descanso	145
Figura 122 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Descanso.	145
Figura 123 Rosas de viento por horas periodo 1 estación Descanso	146
Figura 124 Rosas de viento por horas periodo 2 estación Descanso	146
Figura 125 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Descanso	147
Figura 126 Rosas de viento periodo 4 estación Descanso	147
Figura 127 Rosa de frecuencia total por periodos estación Descanso	148
Figura 128 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo estación Descanso	148

Figura 129 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Descanso	148
Figura 130 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Descanso	149
Figura -131 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Descanso	149
Figura 132 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación Descanso	150
Figura -133 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Descanso	150
Figura -134 Precipitación horaria estación Calenturitas [mm]	151
Figura 135 Radiación solar global horaria estación Calenturitas [w/m^2].....	151
Figura 136 Radiación solar máxima horaria estación Calenturitas [w/m^2].....	151
Figura 137 Temperatura promedio horaria estación Calenturitas [°C]	151
Figura 138 Temperatura máxima horaria estación Calenturitas [°C].....	152
Figura 139 Temperatura mínima horaria estación Calenturitas [°C]	152
Figura 140 Humedad relativa horaria estación Calenturitas [%]	152
Figura 141 Velocidad del viento horaria estación Calenturitas [m/s].....	152
Figura 142 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Calenturitas [mm]	153
Figura -143 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Calenturitas (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]	153
Figura -144 Diagrama de cajas radiación solar global estación Calenturitas [w/m^2]	153
Figura 145 Diagrama de cajas temperatura estación Calenturitas [°C].....	153
Figura 146 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Calenturitas [m/s]	154
Figura -147 Rosa de vientos total por periodo estación Calenturitas	154
Figura 148 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Calenturitas	154
Figura 149 Rosas de viento por horas periodo 1 estación Calenturitas	155
Figura 150 Rosas de viento por horas periodo 2 estación Calenturitas	155
Figura 151 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Calenturitas	156
Figura -152 Rosas de viento periodo 4 estación Calenturitas	156
Figura 153 Rosa de frecuencia total por periodos estación Calenturitas	157

Figura 154 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo estación Calenturitas.....	157
Figura -155 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Calenturitas.....	158
Figura 156 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Calenturitas	158
Figura -157 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Calenturitas.....	159
Figura 158 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación Calenturitas	159
Figura -159 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Calenturitas.....	160
Figura 160 Precipitación horaria estación La Francia IDEAM [mm]	161
Figura 161 Temperatura promedio horaria estación La Francia IDEAM [°C]	161
Figura 162 Temperatura máxima horaria estación La Francia IDEAM [°C].....	161
Figura 163 Temperatura mínima horaria estación La Francia IDEAM [°C]	161
Figura 164 Humedad relativa horaria estación La Francia IDEAM [%]	162
Figura 165 Velocidad del viento horaria estación La Francia IDEAM [m/s].....	162
Figura 166 Diagrama de cajas precipitación horaria estación La Francia IDEAM [mm]	162
Figura 167 Diagrama de cajas precipitación horaria estación La Francia IDEAM (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm].....	162
Figura 168 Diagrama de cajas velocidad del viento estación La Francia IDEAM [m/s]	163
Figura 169 Rosa de vientos total por periodo estación La Francia IDEAM	163
Figura 170 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación La Francia IDEAM.....	163
Figura 171 Rosas de viento por horas periodo 1 estación La Francia IDEAM ...	164
Figura 172 Rosas de viento periodo 4 estación La Francia IDEAM	164
Figura 173 Rosa de frecuencia total por periodos estación La Francia IDEAM .	165
Figura 174 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo estación La Francia IDEAM.....	165
Figura 175 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación La Francia IDEAM.....	165

Figura 176 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación La Francia IDEAM	166
Figura 177 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación La Francia IDEAM	166
Figura 178 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación La Francia IDEAM	167
Figura 179 Calendarios meteorológicos estación Borrego.....	168
Figura 180 Calendarios meteorológicos estación Cerrolargo.....	169
Figura 181 Calendarios meteorológicos estación Descanso.....	170
Figura 182 Calendarios meteorológicos estación Calenturitas	171
Figura 183 Calendarios meteorológicos estación La Francia.....	172
Figura 184 Serie de tiempo TSP estaciones de fondo urbano (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	173
Figura 185 Serie de tiempo PM_{10} estaciones de fondo urbano (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	174
Figura 186 Serie de tiempo TSP estaciones de efecto de trafico (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	175
Figura 187 Serie de tiempo PM_{10} estaciones de efecto de trafico (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	175
Figura 188 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM1	176
Figura 189 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM2	177
Figura 190 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM3	178
Figura 191 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM4	179
Figura 192 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM5	180
Figura 193 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM6	181
Figura 194 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM7	182
Figura 195 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM9	183
Figura 196 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM11	184
Figura 197 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM12	185
Figura 198 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM13	186
Figura 199 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM14	187

Figura 200 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM15	188
Figura 201 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM18	188
Figura 202 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM19	189
Figura 203 Correlación estaciones de TSP Periodo 1.....	190
Figura 204 Correlación estaciones de TSP Periodo 2.....	190
Figura 205 Correlación estaciones de TSP Periodo 3.....	191
Figura 206 Correlación estaciones de TSP Periodo 4.....	191
Figura 207 Correlación estaciones de PM ₁₀ Periodo 1	192
Figura 208 Correlación estaciones de PM ₁₀ Periodo 2	192
Figura 209 Correlación estaciones de PM ₁₀ Periodo 3	193
Figura 210 Correlación estaciones de PM ₁₀ Periodo 4	193
Figura 211 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM1.....	194
Figura 212 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM2.....	195
Figura 213 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM3.....	195
Figura 214 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM4.....	196
Figura 215 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM5.....	196
Figura 216 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM12.....	196
Figura 217 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM6.....	197
Figura 218 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM9.....	197
Figura 219 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM7.....	198
Figura 220 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM11.....	198

Figura 221 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM14.....	199
Figura 222 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM13.....	199
Figura 223 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM15.....	200
Figura 224 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM19.....	200
Figura 8-225 Modelo de deposición húmeda estación ZM1 -Borrego	204
Figura 226 Modelo de deposición húmeda estación ZM2 – Cerrolargo	204
Figura 227 Modelo de deposición húmeda estación ZM3 - Borrego	205
Figura 228 Modelo de deposición húmeda estación ZM4 – Cerrolargo	205
Figura 229 Modelo de deposición húmeda estación ZM5 - Borrego	206
Figura 230 Modelo de deposición húmeda estación ZM6 – Borrego	206
Figura 231 Modelo de deposición húmeda estación ZM7 - Calenturitas.....	207
Figura 232 Modelo de deposición húmeda estación ZM9 – Cerrolargo	207
Figura 233 Modelo de deposición húmeda estación ZM12 - Borrego	208
Figura 234 Modelo de deposición húmeda estación ZM13 – Descanso	208
Figura 235 Modelo de deposición húmeda estación ZM15 - Borrego	209
Figura 236 Modelo de deposición húmeda estación ZM19 - Descanso.....	209
Figura 237 Modelo de deposición húmeda estación ZM1 – Borrego	210
Figura 238 Modelo de deposición húmeda estación ZM2 – Cerrolargo	210
Figura 239 Modelo de deposición húmeda estación ZM3 – Borrego	211
Figura 240 Modelo de deposición húmeda estación ZM5 – Borrego	211
Figura 241 Modelo de deposición húmeda estación ZM6 - Borrego.....	212
Figura 242 Modelo de deposición húmeda estación ZM7 – Calenturitas.....	212
Figura 243 Modelo de deposición húmeda estación ZM9 - Cerrolargo.....	213
Figura 244 Modelo de deposición húmeda estación ZM12 - Borrego	213
Figura 245 Modelo de deposición húmeda estación ZM14 – Cerrolargo	214
Figura 246 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1	215

Figura 247 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3	216
Figura 248 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4	217
Figura 249 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5	217
Figura 250 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6	218
Figura 251 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7	219
Figura 252 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12	220
Figura 253 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15	220
Figura 254 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13	221
Figura 255 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15	221
Figura 256 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19	222
Figura 257 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1 (Enero y febrero)	223
Figura 258 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3 (Enero y febrero)	224
Figura 259 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4 (Enero y febrero)	225
Figura 260 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5 (Enero y febrero)	225
Figura 261 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6 (Enero y febrero)	226

Figura 262 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7 (Enero y febrero)	227
Figura 263 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12 (Enero y febrero)	228
Figura 264 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15 (Enero y febrero)	228
Figura 265 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13 (Enero y febrero)	229
Figura 266 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19 (Enero y febrero)	230
Figura 267 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1	231
Figura 268 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3	232
Figura 269 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4	233
Figura 270 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5	233
Figura 271 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6	234
Figura 272 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7	235
Figura 273 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12	236
Figura 274 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15	236
Figura 275 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13	237
Figura 276 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19	238

Figura 277 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1 (Enero y febrero)	239
Figura 278 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3 (Enero y febrero)	240
Figura 279 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4 (Enero y febrero)	241
Figura 280 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5 (Enero y febrero)	241
Figura 281 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6 (Enero y febrero)	242
Figura 282 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7 (Enero y febrero)	243
Figura 283 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12 (Enero y febrero)	244
Figura 284 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15 (Enero y febrero)	244
Figura 285 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13 (Enero y febrero)	245
Figura 286 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19 (Enero y febrero)	246

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	FICHAS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	122
ANEXO B	CALENDARIOS METEOROLÓGICOS, COMPORTAMIENTO DIARIO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES.....	168
ANEXO C	FICHAS DESCRIPTIVAS DE LOS NIVELES DE PM.....	173
ANEXO D	RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE PM EN UNA COMBINACIÓN DE ESTACIONES DE CALIDAD DE AIRE CON ESTACIONES METEOROLÓGICA.....	194
ANEXO F	RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS	215
ANEXO G	RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS (ENERO Y FEBRERO).....	223
ANEXO H	RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS (FLUJO).....	231
ANEXO I	RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS - FLUJO (ENERO Y FEBRERO)	239

RESUMEN

TITULO: Variabilidad espacial y temporal del material particulado en aire ambiente en la zona carbonífera del departamento del Cesar y su interrelación con la meteorología*

AUTOR: Luis Alberto Morales Rincón**

PALABRAS CLAVE: Zona Carbonífera del Cesar, minería de carbón a cielo abierto, material particulado, meteorología, resuspensión, deposición húmeda, radiación global.

DESCRIPCIÓN:

La zona céntrica del Cesar es un área semidesértica que en 2011 produjo cerca de 44 millones de toneladas de carbón mineral, lo cual ha generado impactos significativos en el ambiente. El presente trabajo tiene por objeto caracterizar la variación espacial y temporal del material particulado y su interrelación con la variabilidad meteorológica en la zona a partir de mediciones meteorológicas y de material particulado (partículas totales en suspensión – TSP, y de material particulado respirable – PM_{10}).

El análisis de las series temporales meteorológicas muestra que la circulación atmosférica en la zona es compleja, presenta patrones diarios difíciles de predecir, los cuales no pueden ser fácilmente descritos en términos estadísticos. Esta complejidad está probablemente asociada a la interacción entre fenómenos sinópticos, locales y convección húmeda.

La comparación de mediciones con la estación de referencia, indica que, la actividad minera en la zona contribuye de forma notable a los niveles de material particulado. La alta correlación entre TSP y PM_{10} sugiere que la mayoría de los aerosoles por encima de la concentración perimetral son primarios.

La precipitación reduce dramáticamente los niveles de material particulado. Para describir el fenómeno de deposición húmeda se desarrolló y ajustó un modelo matemático basado en una relajación de primer orden proporcional a la tasa de precipitación. El modelo, que usa promedios diarios de concentración y precipitaciones diarias, muestra reducción de concentración aun para precipitaciones ligeras. El modelo reporta mayor eficiencia para PM_{10} . La cantidad de precipitación mensual presentó una mejor relación con las concentraciones de TSP lo que podría corresponder a mitigación de fuentes de este contaminante. Se encontró evidencia de posible atenuación de radiación global debido a material particulado durante la época seca, lo que podría estar generando impactos sobre la producción agropecuaria de la zona.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Rodrigo Jiménez Pizarro

ABSTRACT

TITLE: Spatiotemporal variability and meteorological control of particulate matter pollution in a large open-pit coal mining region in Colombia*

AUTHOR: Luis Alberto Morales Rincón **

KEYWORDS: Coal mining region of Cesar, open pit coal mining, particulate matter, meteorology, resuspension, wet deposition, global radiation.

DESCRIPTION:

In 2011, approximately 44 million tons of coal were produced in the semi desertic area of central Cesar. The coal industry has strongly impacted the environment. The main goal of the present work was to characterize spatial and temporal variations of particulate matter (Total suspended particulates (TSP) and particulate matter below 10 μ m (PM₁₀)) in central Cesar as well as to study the relationship between such variations with meteorological factors in the area.

The results of the analysis of the temporal series of meteorological variables revealed the complex nature of the atmospheric circulation in the region, which was reflected on the difficulties associated with the statistical prediction of patterns of atmospheric circulation. This could be attributed to the interdependence between local and synoptic phenomena and moist convection.

On the other hand, comparison of the collected data with the reference station indicated that the coal industry has a significant effect on the levels of particulate matter. Moreover, the strong correlation between TSP and PM₁₀ suggested that the generation of secondary aerosols would have little impact on the air quality.

In addition, precipitation drastically reduces the levels of particulate matter. In order to describe the phenomenon of wet deposition, a mathematical model was developed based on a first order relaxation, which was proportional to the precipitation rate. Daily concentration averages as well as daily precipitation values were used in this model, which showed higher reductions in concentration, even at low precipitation levels. Nonetheless, the model proved optimal for PM₁₀. Monthly precipitation values showed a better correlation with TSP concentrations, which could be related to a decrease in the production of this contaminant. Finally, there seems to be evidence of a decrease in global radiation during dry weather seasons due to particulate matter, which could potentially affect agricultural activities in the region.

* Graduation project

** Faculty of Physical-chemical Engineering. Chemical Engineering Department. Director: Rodrigo Jiménez Pizarro

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto ha analizado los registros de calidad de aire y meteorología almacenados por el Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar - SEVCA_ZCC con el propósito de encontrar relaciones entre las concentraciones de material particulado (PM) y las variables meteorológicas.

En el presente documento se analiza el periodo comprendido entre los años 2009 – 2011 y pretende estudiar las variaciones de PM durante las diferentes épocas del año. La primera etapa consistió en la estructuración de una base de datos en la que se consolidó toda la información de calidad de aire y meteorología de zona y se evaluó su calidad. Posteriormente se establecieron periodos meteorológicos que permitieron estudiar el comportamiento entre y dentro de los diferentes conjuntos de variables, en varias escalas temporales tales como intradiaria, diaria y mensual a través de diferentes tipos de gráficos.

Además se realizó un conjunto de análisis que permitieron asociar registros meteorológicos a estaciones de calidad de aire cuya medición fue realizada en sitios diferentes, para lo cual se estudió en detalle la localización de las estaciones de calidad de aire respecto a las principales fuentes generadoras de PM y el comportamiento de las concentraciones registradas por los receptores ambientales respecto a las variables meteorológicas. Debido a la importante relación encontrada entre precipitación y niveles de PM se desarrolló un modelo de deposición húmeda.

Con los resultados de las etapas anteriores se procedió a identificar los principales patrones y relaciones entre los conjuntos de variables, posibles orígenes de las mayores concentraciones e interrelaciones entre los hallazgos.

2. GENERALIDADES

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada su magnitud, la explotación minera es el principal foco de desarrollo social y económico de la zona céntrica del departamento del Cesar, lo que ha generado un sinnúmero de actividades complementarias tales como aumento de la dinámica comercial y de servicios, incremento del parque automotor de vehículos livianos y pesados en las vías de los municipios y zonas periféricas, lo cual ha aumentado la demanda en talleres y suministro de combustible además del incremento en el consumo de agua potable y otros servicios, generando esto un importante impacto en los ecosistemas y comunidades adyacentes, considerándose el aire uno de los recursos que registran más afectación.

La minería en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC) es la actividad más importante presente en la zona y una de las mayores fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, sin embargo no es la única fuente; por lo anterior Corpocesar y los entes ambientales nacionales y de la zona velan por un adecuado uso del recurso aire vigilando que no se sobrepasen los niveles de material particulado (PM) que está en capacidad de asimilar este recurso con el propósito de evitar afectación en la salud de los habitantes y de los ecosistemas circundantes, para lo cual se han instalado equipos de medición de calidad de aire que permiten monitorear el estado de éste.

Los equipos instalados en la zona conforman el Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar - SEVCA_ZCC el cual inició su operación el 7 de Abril de 2007 con un total de 6 equipos instalados. Actualmente su diseño se encuentra totalmente implementado con una cobertura de 92.000 Ha en una zona de 40 km de largo y 40 km de ancho con 16 estaciones de monitoreo instaladas, de las cuales a la fecha se encuentran operativas 14 de estas, equipadas con 14 muestreadores de PM₁₀, 10 de TSP y 1 de PM_{2.5}. Además en la zona se cuenta con 6 estaciones meteorológicas y 5 pluviómetros.

Tabla 1 Estaciones del SEVCA_ZCC

ID	Estación	Parámetro	Tecnología de medición		
			AUT	SEM	MAN
ZM1	La Loma Centro	TSP			x
		PM ₁₀			x
ZM2	La Jagua Centro	TSP			x
		PM ₁₀		x	
		PM _{2.5}		x	
		Meteorología	x		
ZM3	La Loma 2	TSP			x
		PM ₁₀	x		
		Pluviometría	x		
ZM4	Las Palmitas	PM ₁₀			x
ZM5	La Aurora	TSP			x
		PM ₁₀			x
ZM6	Boquerón	TSP			x
		PM ₁₀			x
ZM7	Plan Bonito	TSP			x
		PM ₁₀			x
ZM9	La Jagua Vía	TSP			x
		PM ₁₀			x
ZM11	Background (Minguillo)	PM ₁₀		x	
		Pluviometría	x		
ZM12	Rincón Hondo	TSP			x
		PM ₁₀			x
		Pluviometría	x		
ZM13	El Hatillo	TSP			x
		PM ₁₀			x
ZM14	Estados Unidos	TSP			x
		PM ₁₀ *			x
ZM15	Chiriguaná	PM ₁₀	x		
		Pluviometría	x		
ZM17	El Prado	PM ₁₀ **			x
ZM18	Móvil 1-Norcabón	PM ₁₀ **			x
ZM19	Becerril	PM ₁₀		x	
		Pluviometría	x		

AUT = Automático, SEM = Semiautomático o secuencial, MAN = Manual

*equipos sin serie de tiempo

**estación fuera de servicio

Fuente: SEVCA_ZCC

En cuanto a los equipos de medición de calidad del aire, en su mayoría registran la concentración de material particulado promedio en 24 horas, sin embargo se

cuenta con dos equipos de medición continua; para las variables meteorológicas todos los equipos realizan registro automático generalmente cada 30 minutos de las diferentes variables monitoreadas. En la Tabla 1 se detalla la distribución de los equipos que conforman el sistema.

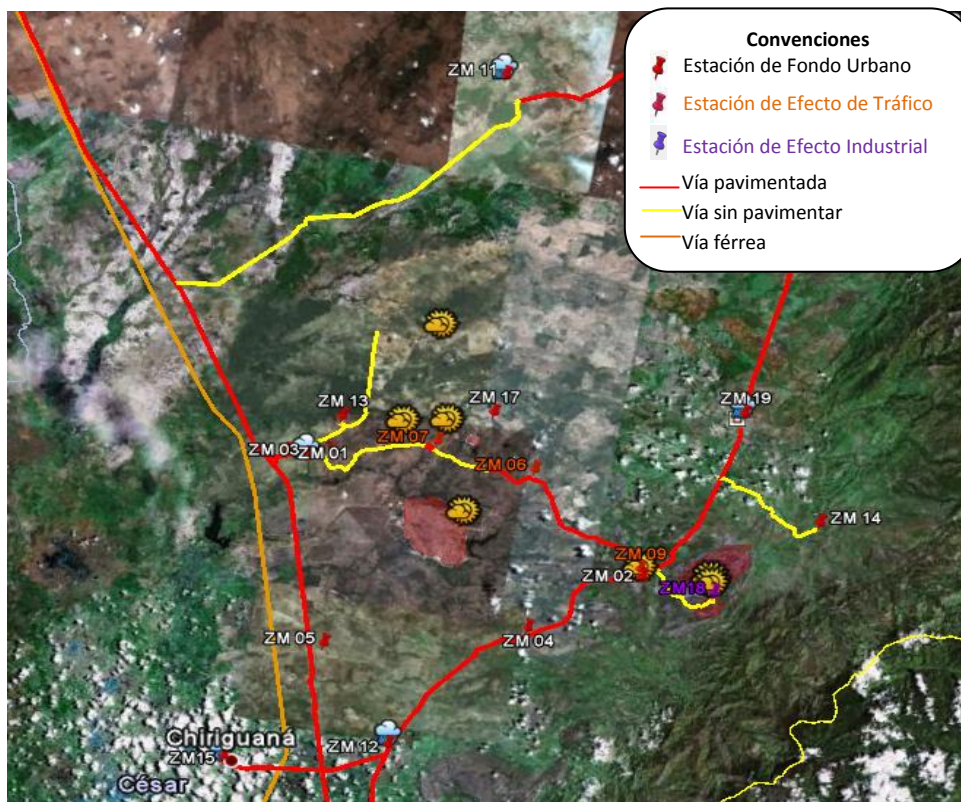


Figura 1 Ubicación de estaciones
Fuente: SEVCA_ZCC

El sistema de vigilancia durante su operación ha compilado información sobre los parámetros de calidad de aire monitoreados en cada una de sus estaciones (TSP y/o PM₁₀), así como sobre variables meteorológicas medidas en diferentes estaciones distribuidas en la zona de estudio.

La información recopilada ha servido como base para la evaluación de las medidas de mitigación exigidas a las empresas que realizan la explotación de carbón. Las medidas de mitigación se establecen mediante una evaluación anual, en la que de acuerdo con los días durante el año en que se registraron concentraciones que superaron los niveles máximos anuales permisibles de

exposición establecidos por la legislación vigente se divide el área de jurisdicción del sistema de vigilancia y se asigna a las diferentes zonas la clase de área de contaminación según lo establecido el decreto 948 de 1995 modificado por el decreto 979 de 2006.

Debido a la fuerte relación entre los niveles de contaminantes y las condiciones meteorológicas, la mejora o degradación de la calidad del aire generada por los cambios en las emisiones puede no verse claramente debido a la variabilidad meteorológica, ya que los efectos de las emisiones en las tendencias de las concentraciones son usualmente mucho menores que los efectos causados por las condiciones meteorológicas. Es por esto que para evaluar los cambios en la calidad del aire debidos a los cambios de emisión o acciones de control debe entenderse la influencia de la variabilidad meteorológica y climática (Wise y Comrie, 2005).

De acuerdo con los resultados presentados en los informes de operación del SEVCA_ZCC, los niveles promedio de material particulado han descendido en el último año pese al importante aumento en la producción de carbón. Sin embargo debe considerarse que los años 2009 y 2010 fueron años atípicos debido a los efectos causados por el fenómeno del Niño y la Niña, los cuales generaron intensificación en los periodos secos y húmedos generando mayor amplitud que la oscilación de la serie de tiempo lo que plantea la incertidumbre respecto a si las variaciones observadas en los niveles promedios de PM obedecen a las medidas de mitigación y controles en las fuentes de emisión o a variabilidad meteorológica y climática¹. Por otra parte, las mediciones sugieren que durante los periodos que no presentan eventos de precipitación los niveles de material particulado alcanzan niveles elevados, incluso registrando excedencias a las normas diarias tanto de TSP como PM₁₀.

Dentro de la política actual del estado se contempla el incremento de la actividad minera como fuente para el apalancamiento del desarrollo de las regiones lo que

¹ Según boletín No2 del SEVCA_ZCC

potencia el crecimiento de esta actividad en la ZCC. Según datos publicados por Ingeominas (2011) entre los años 2005 y 2010 se ha incrementado la producción de carbón en la ZCC a una tasa promedio anual de 1.8 millones de toneladas, lo que equivale a un incremento anual promedio del 6.3%. Además se proyecta un aumento en la producción para los próximos años y una vida útil de estos proyectos de por lo menos 30 años, es por esto que se hace necesario evaluar el estado de la calidad del aire en las distintas estaciones durante los últimos años y la efectividad de las medidas de control y mitigación implementadas, para lo cual es de singular importancia el entendimiento de la relación existente entre las variables meteorológicas y los niveles de PM.

Este proyecto está encaminado a entender los efectos generados por las condiciones meteorológicas sobre los niveles de PM para con esto comprender sus relaciones causa-efecto.

Esta investigación busca dar respuesta a las siguientes preguntas científicas:

- Que influencia tienen las condiciones meteorológicas, p.e. pluviosidad, en la concentración de PM?
- La tendencia a la reducción de concentración de PM es estadísticamente significativa?
- De serlo, esta tendencia a la reducción del PM es asociable a variabilidad meteorológica (y/o cambio climático) ó tiene su origen en actividades intencionales de mitigación?

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La zona céntrica del departamento del Cesar es un valle semidesértico localizado entre los 9.3° y 9.9° de latitud norte y 73.6° -73.2° de longitud oeste con elevación típica entre 40 y 150 msnm. El componente hídrico de la zona es escaso resaltando los ríos Sororia y Pajuil en inmediaciones de La Jagua de Ibirico, Paraluz y Calenturitas cerca al corregimiento de La Loma, además de algunas lagunas menores como La Pachita y Mata de Palma. Las principales fuentes de abastecimiento de agua potable son el río Sororia y aguas subterráneas.

En su conformación geográfica resalta la serranía del Perijá localizada al oriente en dirección NNE, con elevaciones hasta de 2800 msnm. Al NW se encuentra localizada la Sierra Nevada de Santa Marta, en la Figura 2 se presentan los principales rasgos geográficos de la zona. La vegetación de la zona se caracteriza por la presencia principalmente de arbustos y matorrales.

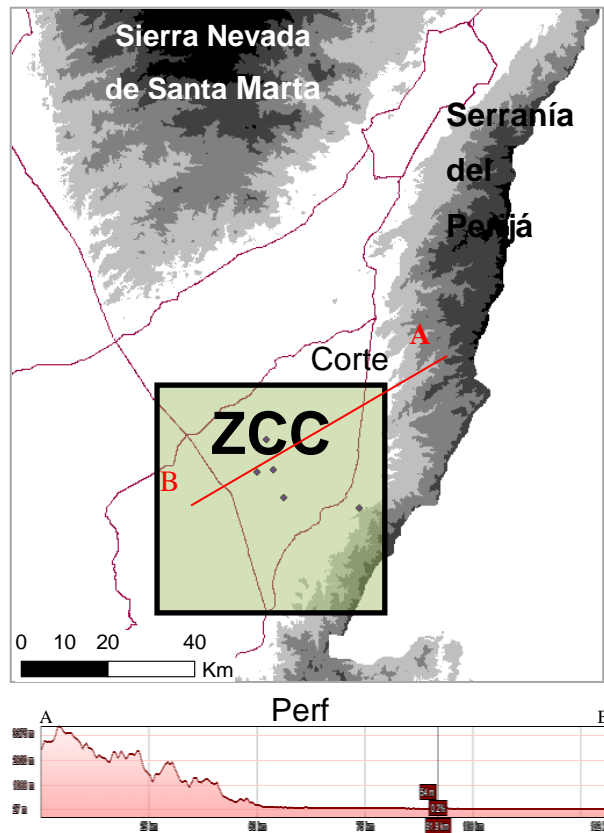


Figura 2 Principales rasgos geográficos de la ZCC
Fuente: El Autor

La zona de explotación minera está conformada por los municipios El Paso, La Jagua de Ibirico, Chiriguana y Becerril, los cuales tienen una superficie de 3.902 km² y una población proyectada a 2011 (con base en el censo del año 2005) de aproximadamente 56.500 habitantes en los centros poblados más importantes tal como se presenta en la Tabla 2. Entre los centros poblados con mayor número de habitantes se encuentran La Loma, La Jagua de Ibirico, Chiriguana, Becerril y Rincón Hondo. Los centros poblados de Plan Bonito, El Hatillo, Boquerón, La

Loma y La Jagua de Ibirico se encuentran localizados próximos a los proyectos de explotación minera.

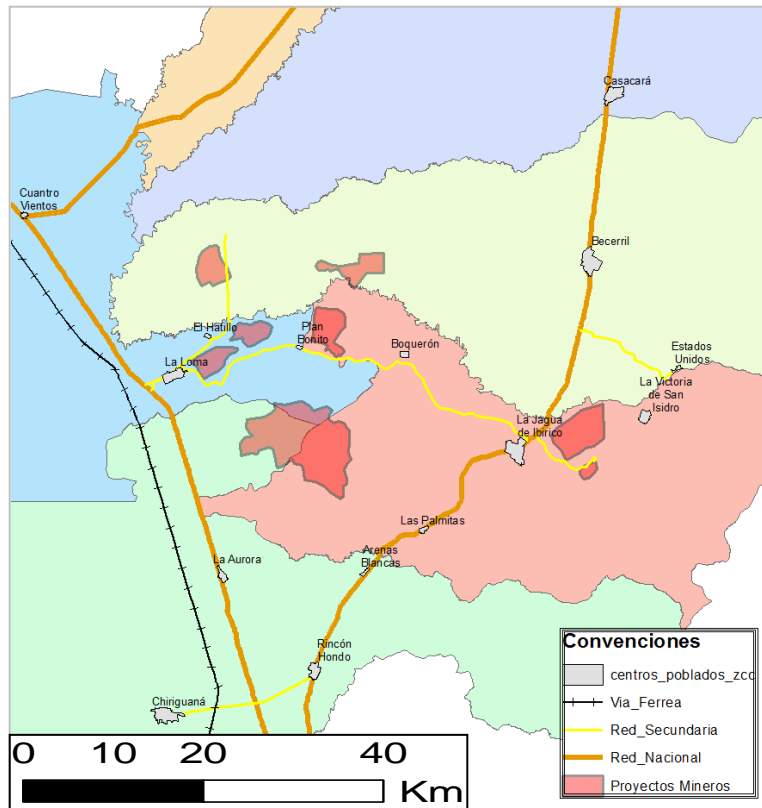


Figura 3 Mapa Político de la ZCC
 Fuente: El Autor

Tabla 2 Población proyectada a 2011 para los centros poblados más importantes de la zona céntrica del Cesar

Centro Poblado	Población proyectada a 2011
Becerril	9.638
Estados Unidos	159
Chiriguaná	12.694
La Aurora	572
Rincón Hondo	2.635
La Loma	10.457
La Jagua de Ibirico	17.317
Boquerón	292
Las Palmitas	900
La Victoria de San Isidro	1.806
Total	56.470

Proyección de población realizada por el autor con base en la tasa de crecimiento empleada por el DANE para la población total del municipio. Debido a que para el 2005 no se había intensificado la actividad minera puede que los factores asociados a esta no se tengan contemplados en esta proyección.

Fuente: El Autor

2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES MINERAS

La actividad minera en la ZCC se ha venido desarrollando desde hace aproximadamente 30 años; en sus inicios, esta actividad se desarrolló de forma artesanal y rudimentaria, a mediados de los años noventa se da inicio a la explotación por parte de empresas multinacionales las cuales industrializan esta actividad, sin embargo debido a diversos factores, entre estos el precio internacional del carbón, las actividades en la zona se desarrollan de forma intensiva y continua desde el año 2005. Con el paso de los años la actividad de explotación carbonífera se ha intensificado al punto que a la fecha el departamento del Cesar produce poco más de la mitad de la producción nacional (51%, Ingeominas 2011), incluso más que el departamento de la Guajira.

Actualmente en la zona se explotan siete proyectos mineros todos categorizados como de gran minería. Esta explotación es realizada por empresas multinacionales como Drummond.LTD, Glencore (C.I Prodeco S.A y Proyecto Integrado la Jagua), Vale, CNR (Colombian Natural Resources), Pacific Coal, entre las que se distribuyen una producción que para el año 2011 fue de 43.6 millones de toneladas.

2.4 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la variabilidad espacial y temporal del material particulado (PM) en la Zona Carbonífera del Departamento del Cesar (ZCC) y establecer su correlación con la variabilidad meteorológica

2.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la variabilidad espacial y temporal (estacionalidad y tendencias de largo plazo) de la meteorología y del PM en la ZCC, y establecer relaciones espaciales y temporales dentro y entre estos dos conjuntos de variables.
- Asociar sitios de medición meteorológica y de PM.

- De encontrarse interrelaciones estadísticamente significativas, proponer (hipótesis de trabajo) y evaluar relaciones causa-efecto entre condiciones meteorológicas y concentración de PM.

2.6 ESTADO DEL ARTE

La meteorología tiene un rol crucial en el transporte y difusión de los contaminantes en el ambiente; factores meteorológicos como velocidad de viento, precipitación y altura de la capa de mezcla juegan roles importantes en la determinación de niveles de contaminación para una tasa dada de emisión de contaminantes. (Bhaskar et al., 2010).

El estudio de las relaciones entre conjuntos de datos de contaminación del aire y registros meteorológicos puede proporcionar información importante relacionada con la naturaleza y tendencias de los datos (Statheropoulos et al., 1998). Sin embargo, las series de calidad de aire y meteorológicas pueden ser complejas. Las fluctuaciones temporales en material particulado suspendido son debidas a diferentes procesos de emisiones, diluciones y acumulaciones operadas en diferentes escalas de tiempo tales como intradiarias, diurna, varios días, estacionales, anuales y de largo plazo.

Los procesos de dilución son afectados por los procesos meteorológicos, los cuales causan que las series de tiempo se vuelvan ruidosas y muestren periodicidades de diferentes escalas. Las variaciones de corto plazo (intradiarias, diurnas y varios días) pueden deberse a factores meteorológicos y a cambios en tasas de emisión de las fuentes tales como vías. Los cambios de largo plazo pueden deberse a factores económicos y políticos que afectan las emisiones de contaminantes en el largo plazo, por consiguiente las series de tiempo pueden presentar características no estacionarias. Las variaciones interanuales pueden deberse a factores de tiempo o climáticos como ciclos monzónicos en los países tropicales (Zaharim A. et al., 2009). Generalmente, los cambios debidos al clima y a los factores meteorológicos son mayores que los cambios debidos a las emisiones de contaminantes (Wise y Comrie, 2005).

Diversos estudios han analizado relaciones entre contaminantes y factores meteorológicos. Wise y Comrie (2005) estudiaron las relaciones entre ozono, material particulado y variables meteorológicas incluyendo humedad específica, altura de la capa de mezcla en la mañana, temperatura media diaria, temperatura mínima diaria, humedad relativa mínima, humedad relativa máxima, temperatura máxima diaria, velocidad del viento promedio de 24 horas, temperatura de rocío promedio de 24 horas, altura de mezcla entre 5 y 6 p.m., humedad relativa promedio de 24 horas y la dirección del viento resultante, encontrando que la velocidad de viento, la altura de la capa de mezcla y la humedad relativa fueron las variables de mayor influencia en las concentraciones de PM_{10} .

Así mismo, Çelík y Kadi (2007), estudiaron la relación entre factores meteorológicos y concentraciones de contaminantes en la ciudad de Karabük, incluyendo en el estudio las variables velocidad de viento, humedad relativa y temperatura del aire y Zaharim et al. (2009), estudiaron las relaciones entre material particulado y variables meteorológicas incluyendo la temperatura y velocidad de viento.

Las variaciones anuales en la meteorología pueden tener un impacto significativo en los niveles medidos de contaminantes, estas fluctuaciones dificultan la evaluación de tendencias de calidad de aire debido a la incertidumbre de si los cambios en calidad de aire son debidos a la meteorología, cambios en las emisiones (estrategias de control y/o crecimientos en las fuentes) o una combinación de los dos. Es por esto que es importante entender el comportamiento meteorológico en la escala temporal, los fenómenos locales, regionales, pseudocontinentales y globales que afectan las condiciones de la zona de estudio y a partir de esto establecer relaciones entre las condiciones meteorológicas y los niveles de PM.

2.7 MARCO TEÓRICO

2.7.1 Evaluación de datos meteorológicos

El control en la calidad de los datos es un prerrequisito para el uso de la información meteorológica. La validación de los datos meteorológicos asegura que la información ha sido adecuadamente generada, que se identifican los valores incorrectos y se detectan problemas que requieren mantenimiento inmediato. Los procedimientos incluyen validación de las estructuras de registro de los datos, rangos, consistencia interna y en el tiempo y pruebas de persistencia y consistencia espacial (Estévez et al., 2011). La evaluación de rango consiste en examinar si los valores se encuentran dentro de los rangos de medición del sensor (Zahumensky, 2004). Las evaluaciones de consistencia consisten en comparar una observación con valores de otros parámetros para ver si son física o climatológicamente consistentes, en el instante o en la serie de tiempo (Vejen et al., 2002)

El control de calidad manual puede ser realizado mediante la inspección manual de errores y valores sospechosos resultantes de las evaluaciones automáticas de rangos, límites y consistencia. Este control es la última fase de procedimiento de control de calidad y su propósito es examinar solo valores erróneos o sospechosos y modificar o aceptar esos valores. La visualización de datos es muy importante en esta etapa e incluye representaciones gráficas de los datos, observación de datos de estaciones cercanas, entre otras (Vejen et al., 2002).

2.7.2 Generalidades sobre contaminación atmosférica

Los aerosoles atmosféricos consisten en partículas que varían en rangos de tamaños desde decenas de angstroms hasta cientos de micrómetros. En general, las partículas gruesas (mayores a $2.5 \mu\text{m}$) y finas (menores a $2.5 \mu\text{m}$), se diferencian en su origen, transformación, mecanismo de remoción de la atmosfera, técnicas de remoción en las fuentes, composición química, propiedades ópticas y patrones de deposición en el tracto respiratorio, por lo cual la distinción entre partículas finas y gruesas es fundamental en cualquier

discusión sobre efectos en la salud, química, física o medición de los aerosoles. (Seinfeld y Pandis, 2006).

La clasificación de partículas según el tamaño que se emplea en la legislación nacional para los niveles máximos de partículas en el aire ambiente incluye partículas suspendidas totales (TSP), partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 μm (PM_{10}) y partículas de diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$). Las partículas suspendidas totales incluyen partículas hasta de 50 μm (EPA, método de referencia).

Las partículas en la atmósfera son removidas por dos mecanismos: deposición sobre la superficie de la tierra (deposición seca) e incorporación en gotas durante la formación de la precipitación (deposición húmeda). Los mecanismos de remoción son eficientes en los extremos del espectro de tamaño de partículas y son ineficientes en un rango intermedio denominado rango de acumulación. Las partículas en el rango de nucleación (menores de 10 nm) y en el rango Aitken (partículas entre 10 nm a 100 nm) se remueven principalmente por coagulación a partículas más grandes. Las partículas gruesas tienen velocidades de sedimentación que las remueven de la atmósfera en tiempos razonablemente cortos, mientras que en el rango de acumulación (tamaño comprendido entre 0.1 y 2.5 μm) los mecanismos de remoción son menos eficientes y causan la acumulación de partículas presentando tiempos de residencia considerablemente más grandes que las de los rangos de nucleación o modos gruesos. (Seinfeld y Pandis, 2006)

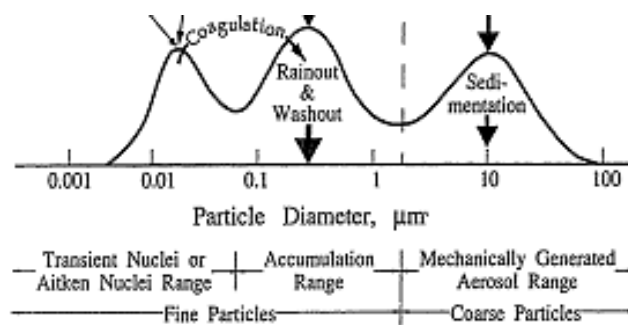


Figura 4 Rango de partículas según su tamaño.
Fuente: Seinfeld y Pandis, 2006.

Los parámetros meteorológicos como temperatura, velocidad del viento, precipitación y altura de mezcla son especialmente importantes en términos de calidad de aire. La velocidad del viento es un indicador del transporte horizontal o ventilación de contaminantes, la precipitación brinda información sobre los procesos de remoción a través de deposición húmeda, la altura de mezcla describe las condiciones verticales de la tropósfera y es un indicador del mezclado vertical de contaminantes. (Mues et al., 2012)

La circulación de escala sinóptica se considera que juega un rol importante en la formación de condiciones de calidad de aire a través de su efecto controlador de las condiciones meteorológicas locales. (Kassomenos, 1998). La topografía también es uno de los parámetros que debe considerarse en estudios de calidad de aire (Bhaskar, 2010). Un tipo de terreno que influye en la circulación del viento es el que alterna montañas y valles (también denominado terreno complejo – IDEAM, 2006), en estos terrenos se producen circulaciones valle montaña que influyen el transporte de contaminantes. (Giri, 2008)

- **Material particulado y velocidad del viento**

Los vientos horizontales juegan un rol significativo en el transporte y dilución de contaminantes. Si la tasa de emisión es relativamente constante, duplicar la velocidad del viento reducirá a la mitad la concentración del contaminante puesto que la concentración es una función inversa de la velocidad del viento. (Godish, 1997)

Vardoulakis y Kasomenos (2008) citando a Kukkonenn (2005) señalan que aunque generalmente se espera que los vientos fuertes dispersen la contaminación generada localmente, también pueden aumentar los niveles de PM₁₀ bajo ciertas condiciones meteorológicas debido a la resuspensión del suelo y polvo de vías, siendo este efecto más notorio en periodos cálidos y días secos.

El efecto de la velocidad del viento en la concentración de material particulado ha sido estudiado por diversos autores. Jones et al. (2010) señalan que para la mayoría de partículas, la concentración se reduce con el aumento en la velocidad

aunque en algunos casos puede observarse un incremento en la concentración a mayores velocidades. Jones et al. (2010) señala que Harrison et al., 2001 encontró que la fracción gruesa del material particulado se reduce cuando la velocidad se incrementa hasta 4 m/s, pero después la concentración se incrementa para velocidades de viento más altas concluyendo que un pequeño componente del material particulado grueso es el resultado de la resuspensión inducida por el viento. Según Jones et al., (2010) en el estudio realizado por Smith et al., 2001 se encontró que en general las concentraciones promedio de PM_{10} se reducían con el recorrido de la velocidad del viento hasta alcanzar una concentración mínima y después se incrementaban.

Las emisiones de polvo fugitivo dependen de los tamaños de partículas, condiciones de la superficie, humedad atmosférica y de superficie, velocidades de viento y actividades que generen la suspensión de polvo y por consiguiente las tasas de emisión y medidas de control están relacionadas con estas propiedades. Cuando las superficies son continuamente perturbadas por vientos intensos, movimiento vehicular y otras actividades humanas, se emite polvo cuando las velocidades exceden los límites de velocidades de suspensión. Los efectos de las diferentes variables se agrupan en un límite de velocidad de fricción. La velocidad de fricción indica las fuerzas cortantes del viento cerca a una superficie erosionable. Gillete *et al.*, 1980 muestra que estos límites varían de 0.19 a 1.82 m/s para suelos con diferentes grados de perturbación, este rango de valores corresponde a velocidades entre 7 y 10 m/s medidos a 7 m sobre el nivel del suelo. Aunque las emisiones comienzan en estas velocidades la cantidad de polvo suspendido se incrementa como una función cubica de la velocidad del viento por encima de la velocidad límite. (Watson *et al.*, 2010)

Las pilas de almacenamiento y actividades de carga crean reservorios de polvo, que mecánicamente inyectan polvo en la atmosfera y son susceptibles a la erosión eólica (Watson *et al.*, 2010). Huertas *et al.*, 2012 citando a USEPA (2006) señala que los factores de emisión de PM_{10} para erosión del viento en pilas de

carbón y en áreas expuestas son proporcionales a la velocidad del viento siguiendo la siguiente ecuación

$$E = 0.00056 \cdot \frac{(U/2.2)^{1.5}}{(SH/2)^{1.4}} \quad (1)$$

Donde

E = Emisión de PM10 [kg/ton]

U = velocidad del viento [m/s]

SH = contenido de humedad del material (porcentaje)

- **Brisas valle montaña**

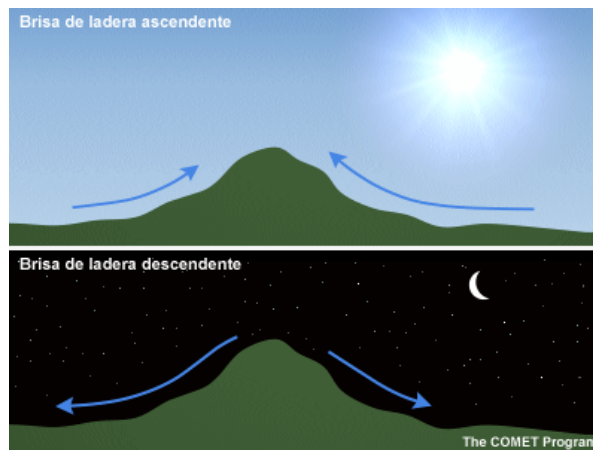


Figura 5 Vientos anabáticos (ascendentes) y catabáticos (descendentes)
Fuente: The COMET Program

La turbulencia mecánica en terrenos con montañas y valles siempre depende del tamaño, la forma y la orientación de los rasgos topográficos. Las montañas y valles se calientan de manera desigual debido al movimiento del sol. En la mañana el sol calienta e ilumina un lado de una montaña o valle, mientras el otro lado permanece oscuro y frío. El aire sobre las pendientes iluminadas se calienta y empieza a elevarse, provocando una brisa de ladera que sube por la montaña (vientos anabáticos), mientras que en las pendientes sombreadas al oeste de las montañas los vientos descienden (vientos catabáticos). Al mediodía el sol ilumina ambos lados. Al final de la tarde la situación es similar a la de la mañana, a medida que el aire se hace más fresco debido al enfriamiento radial el aire, este

desciende al valle desde las colinas más altas. (IDEAM, 2006). Los comportamientos señalados anteriormente se presentan en la Figura 5 y Figura 6.

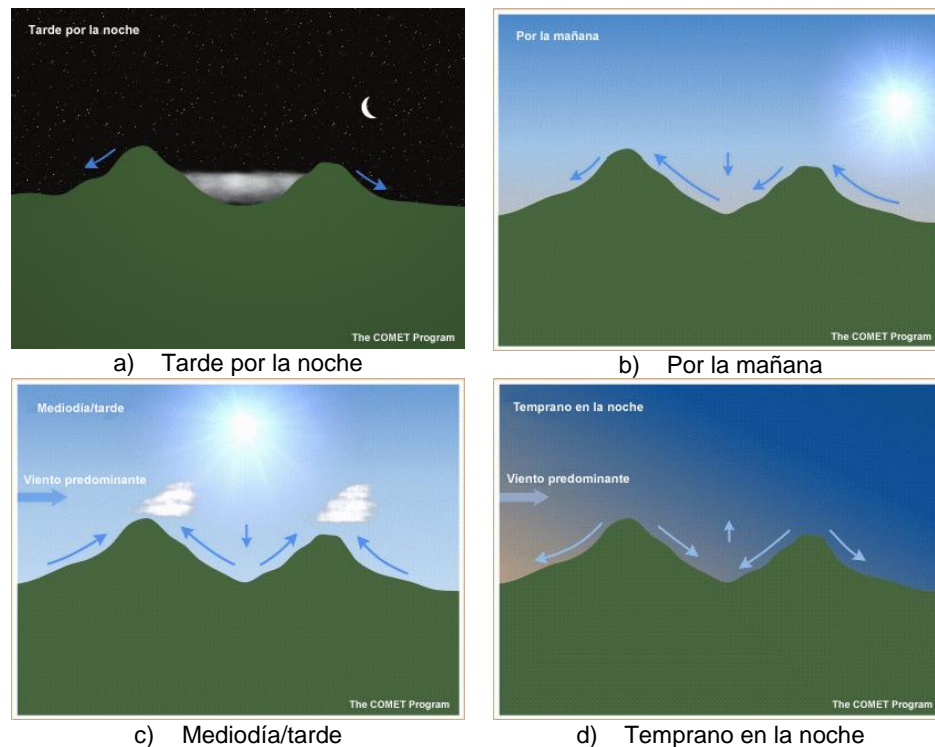


Figura 6 Comportamiento de los vientos durante el día debido a efecto térmico
Fuente: The COMET Program

Correa *et al* (2009) señalan que Whiteman y Doran (1993) identificaron cuatro mecanismos de forzamiento que determinan la estructura vertical de los vientos horizontales. Esos mecanismos son: transporte descendente de momento horizontal, canalización forzada, canalización inducida por gradientes de presión y flujos inducidos térmicamente. Los tres primeros son calificados como forzamientos dinámicos y dependen fundamentalmente de los flujos en la atmósfera libre. En el primer caso el flujo desciende hacia el interior del valle de modo que la circulación local reproduce los patrones de circulación en la mesoescala; este efecto puede ser causado por una mezcla turbulenta vertical o por ondas de gravedad, y ocurre con mayor frecuencia en condiciones atmosféricas inestables y neutras, en valles anchos, de fondo plano y laderas de baja altura. El segundo mecanismo, de canalización forzada, se desarrolla cuando los vientos de mesoescala logran ingresar al interior del valle en razón del tamaño, topografía y orientación de las laderas, logrando que los vientos de

montaña se alineen con el eje del valle. Por último, la canalización inducida por presión se presenta cuando los vientos en el valle responden el mismo gradiente de presión que condiciona los vientos de mesoescala.

- **Condiciones sinópticas**

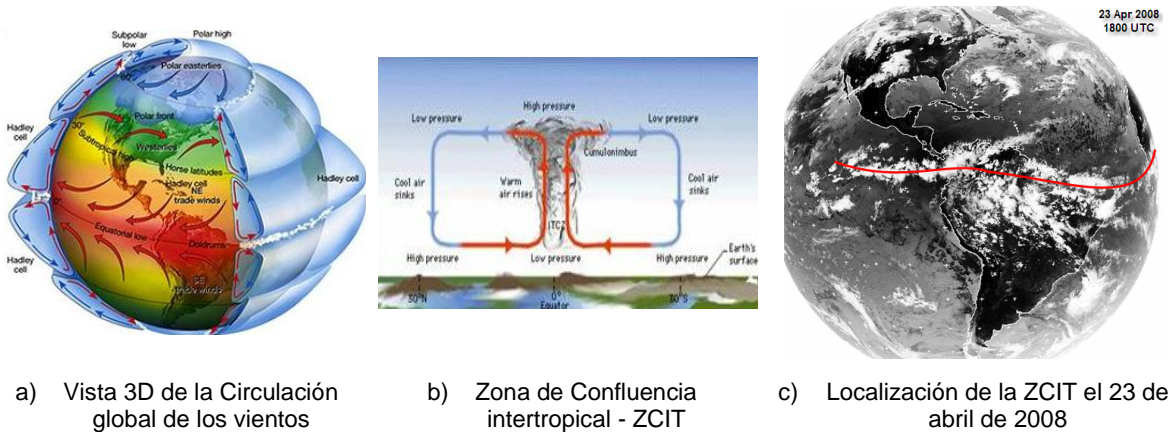
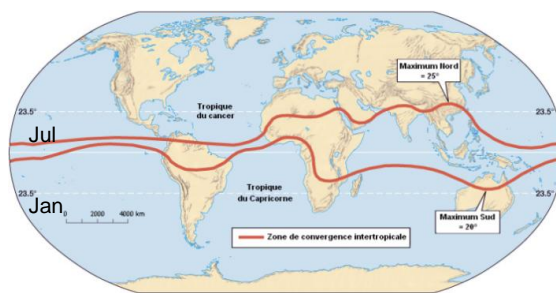
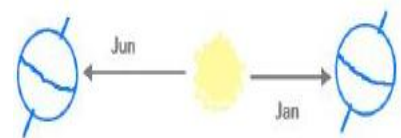


Figura 7 Formación de la zona de confluencia inter tropical – celda Hadley
Fuente: Anónima

Colombia por encontrarse geográficamente ubicada entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio, está sometida a los vientos alisios que soplan del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur, aunque en el país no tienen siempre exactamente estas direcciones. La zona de encuentro de los alisios forma la Zona de Confluencia Intertropical – ZCIT-(Figura 7). Entre julio y agosto la ZCIT se encuentra en su posición extrema al norte del país y los vientos en esos sectores tienen menores velocidades que en otras épocas del año, mientras que entre enero y febrero cuando la zona se encuentra al sur del País los vientos en la región Atlántica se intensifican. (IDEAM, 2006), estas variaciones son presentadas en la Figura 8.



a) Posición de la ZCIT



b) Localización del sol respecto a la tierra en los meses de enero y julio

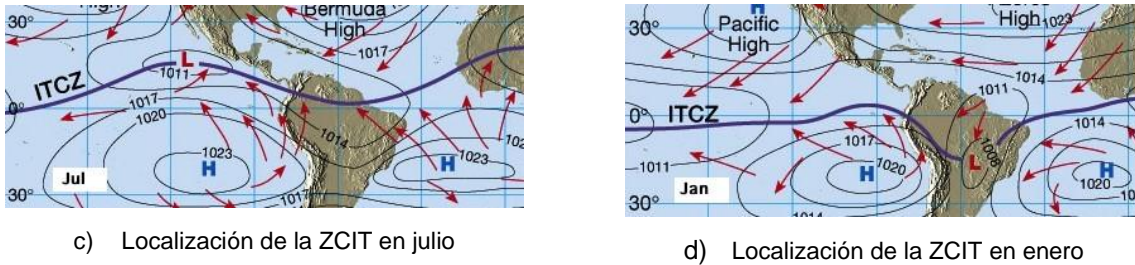


Figura 8 Posición de la ZCIT durante el año
Fuente: Anónima

En la Tabla 3 se relacionan los principales fenómenos de variabilidad tropical según su periodicidad.

Tabla 3 Fenómenos sinópticos en zonas tropicales

Intraestacionales	Interanuales	Decenales
<ul style="list-style-type: none"> Oscilación de Madden – Julian (OMJ). Ondas ecuatoriales (kelvin, Rossby, MRG). Ondas ecuatoriales de gran escala. 	<ul style="list-style-type: none"> Fenómeno del Niño (Oscilación del sur – ENSO) Oscilación cuasi-bienal. 	<ul style="list-style-type: none"> Onda decenal del pacifico (ODP). Onda multidecadal del atlántico (OMA). Oscilación del atlántico norte (OAN).

Fuente: Laing y Evans, 2011

• **Capa límite planetaria y estabilidad atmosférica**

La tropósfera se divide en dos capas (Figura 9), la parte baja conocida como capa límite atmosférica (ABL) o capa límite planetaria (PBL) y la atmósfera libre (FA) que se encuentra entre la ABL y la parte superior de la tropósfera. En cuanto a contaminación atmosférica, la capa principal es la ABL ya que los contaminantes son transportados, difundidos, mezclados, removidos y químicamente modificados en esta capa. Otra diferencia importante entre la FA y la ABL es el tipo de flujo, en la ABL es predominantemente turbulento mientras que en la FA es principalmente laminar. (Fisch, 2009)

La capa límite atmosférica puede ser dividida a su vez en dos capas, una capa de superficie atmosférica (ASL) que se extiende desde la superficie hasta una altura de 120-150m y una capa exterior desde la ASL hasta la atmósfera libre. La capa exterior, tiene un ciclo diurno y puede denominarse capa límite convectiva (CBL)

o capa límite estable (SBL) dependiendo de las condiciones atmosféricas predominantes. La CBL (también conocida como capa de mezcla) se produce por el fuerte calentamiento de la superficie, lo cual produce inestabilidad térmica y ocurre predominantemente durante el día, su parte superior está bien definida y puede ser fácilmente determinada mediante mediciones (sensores remotos o sondeos). Dentro de la CBL, los contaminantes son mezclados verticalmente por convección. La máxima extensión de esta capa ocurre al final de la tarde variando desde 0.8 hasta 2-3 km. La CBL presenta una evolución en el tiempo de su profundidad dependiendo de los flujos de calor sensible de la superficie. Para superficies húmedas se generan mayores flujos de calor latente y por consiguiente la CBL es más baja, mientras que para superficies secas, se generan mayores flujos de calor sensible y CBL más altas. La SBL ocurre principalmente en la noche debido al enfriamiento de la superficie, su extensión es mucho más baja que la CBL y varía entre 0.1 km a 0.3 km, su evolución en el tiempo depende fuertemente de los vientos, para una noche con fuertes vientos la SBL será mucho mayor debido a la turbulencia mecánica generada. Para una noche de calmas con baja turbulencia la SBL será poco profunda. (Fisch, 2009)

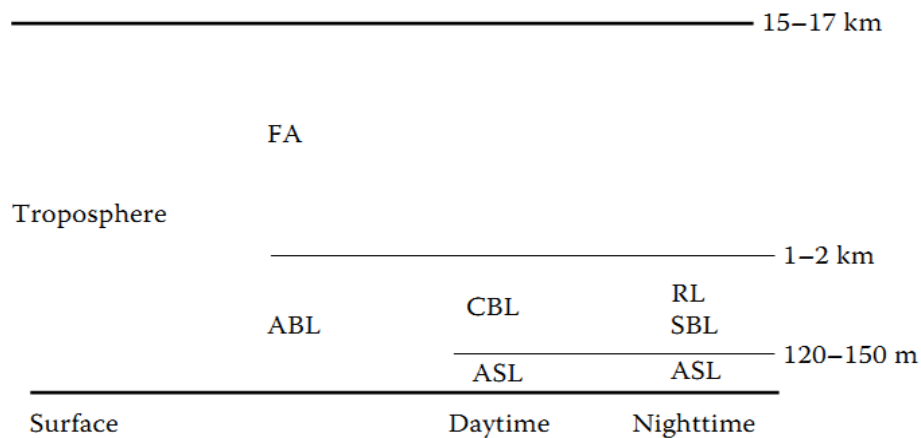


Figura 9 Estructura de la tropósfera
 Fuente: Fisch, 2009

El gradiente de temperatura en la atmósfera tiene una gran influencia en el movimiento vertical del aire afectando el mezclado de los contaminantes (Seinfeld y Pandis, 2006). Se pueden definir tres regímenes de estabilidad atmosférica

mediante la comparación del gradiente adiabático con el gradiente atmosférico Figura 10. La condición de inestabilidad se presenta cuando el gradiente atmosférico es mayor que el gradiente adiabático seco lo cual favorece el movimiento vertical del aire permitiendo que el aire ascendente que está más caliente que sus alrededores continúe elevándose haciendo que los contaminantes se mezclen rápidamente. Por el contrario, las condiciones de estabilidad se presentan cuando el gradiente atmosférico es menor que el gradiente adiabático seco lo cual inhibe el movimiento vertical. Cuando los gradientes atmosférico y adiabático son iguales se presentan condiciones neutras. (USEPA, 2005)

Cuando las condiciones son extremadamente estables, el aire frío cercano a la superficie es atrapado por una capa superior de aire más caliente lo cual es conocido como inversión (la temperatura del aire aumenta con la altura). La inversión radiativa es la forma más frecuente de inversión. Durante la noche (especialmente si no hay nubes y los vientos son ligeros), el enfriamiento radiativo de la superficie frecuentemente hace que el aire de superficie sea más frío que el aire superior, creando una capa estable en algunos metros en la atmosfera que restringe la ventilación de emisiones durante la noche por lo cual los contaminantes emitidos quedan retenidos y pueden alcanzar concentraciones relativamente altas (Seinfeld y Pandis, 2006). Este enfriamiento radiativo del suelo y su calentamiento por radiación solar durante el día causan cambios en la estabilidad de la atmósfera.

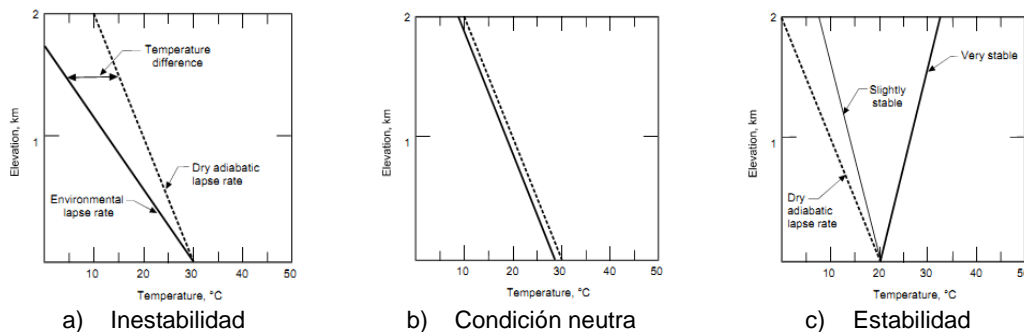


Figura 10 Categorías de estabilidad atmosférica (USEPA, 2005)

Fuente: USEPA, 2005

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se contemplaron las siguientes etapas:

1. Evaluación de datos existentes y selección del periodo de análisis.
2. Caracterización de la variación espacial y temporal de las variables meteorológicas en la ZCC y establecimiento de relaciones entre estas.
3. Caracterización de la variación espacial y temporal de los niveles de material particulado PM₁₀ y TSP en la ZCC y establecimiento de relaciones entre estos.
4. Asociación de sitios de medición de variables meteorológicas a estaciones de calidad de aire
5. Establecimiento de relaciones espaciales y temporales entre variables meteorológicas y niveles de material particulado.

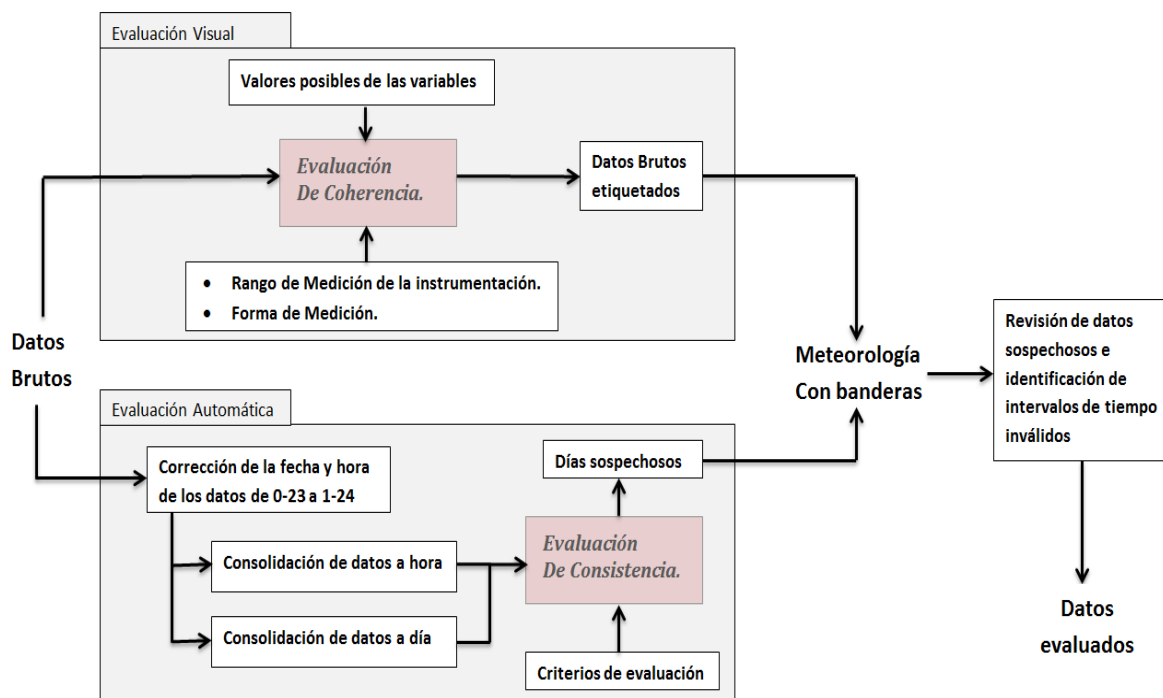
3.1 EVALUACIÓN DE DATOS EXISTENTES Y SELECCIÓN DE PERIODO DE ANÁLISIS

Los datos de calidad de aire fueron previamente validados por el operador siguiendo un procedimiento documentado para la evaluación de datos de medición de material particulado, en el que se contempla la verificación de flujo, tiempos de operación, consistencia física, desempeño de los equipos, etc. Adicionalmente estos datos cuentan con banderas las cuales brindan información sobre la calidad del dato y las razones de validación o invalidación de los mismos.

Por otra parte para la información meteorológica debido a las diferencias en los intervalos de tiempo empleados para el registro de esta, fue necesaria su estandarización para su revisión y posterior análisis. Esta consolidación fue realizada a través de un manejador de bases de datos en el que se consolidó la información a periodos horarios, diarios y mensuales. Es importante resaltar que la consolidación de la velocidad del viento fue realizada mediante promedios vectoriales.

Para la evaluación de los datos meteorológicos se integraron las metodologías sugeridas por el IDEAM y Estévez *et al* (2011), las cuales incluyen criterios de coherencia y consistencia para la identificación de datos sospechosos que requieran una verificación posterior.

En la Figura 11 se presenta el modelo conceptual de la metodología empleada en esta etapa.



Coherencia: Que los datos estén en un intervalo posible.

Consistencia: Que se represente de forma lógica el comportamiento de la variable.

Figura 11 Modelo conceptual para la evaluación de datos meteorológicos
Fuente: El Autor

La primera actividad correspondió a la verificación de coherencia o rango de los datos. Consistió en corroborar que todos los datos almacenados estuviesen en las mismas unidades y que los valores reportados se encontraran dentro del intervalo de valores posibles de la variable.

Para la revisión de los datos se utilizaron diagramas de caja horarios para cada variable de cada estación. En estos gráficos se identificaron datos sospechosos o fuera del valor posible de la variable los cuales fueron etiquetados con una bandera por variable.

Para la evaluación de consistencia, se establecieron criterios que permitieron verificar el adecuado comportamiento de la variable bajo unas condiciones

establecidas. Para esto se consultaron los lineamientos establecidos por el IDEAM para la evaluación de datos meteorológicos a nivel nacional encontrándose criterios de evaluación para las variables temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad y radiación.

Los criterios utilizados se presentan en la Tabla 4 y son válidos para los días sin lluvia (se considera un día sin lluvia aquel en que la precipitación acumulada diaria sea inferior a 1 mm).

Tabla 4 Criterios para la evaluación de consistencia de datos meteorológicos

Variable	Criterio	Ejemplo
Temperatura	$T_{13} > T_{19} > T_{07}$ (2)	
Temperatura Mínima	$T_{MIN} < T_{13}$ del día anterior (3) $T_{MIN} < T_{19}$ del día anterior (4) $T_{MIN} < T_{07}$ del día anterior (5)	
	$T_{MIN} < T_{med}$ (6)	
Temperatura Máxima	$T_{MAX} > T_{07}$ (7) $T_{MAX} > T_{19}$ (8) $T_{MAX} \geq T_{13}$ (9)	
	$T_{MAX} > T_{med}$ (10)	

Variable	Criterio	Ejemplo																								
Humedad	$HR_{07} > HR_{19} > HR_{13}$																									
(11)																										
Radiación global horaria		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Hora</th> <th>Radiación (w/m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7</td><td>120</td></tr> <tr><td>8</td><td>350</td></tr> <tr><td>9</td><td>600</td></tr> <tr><td>10</td><td>750</td></tr> <tr><td>11-14</td><td>1050</td></tr> <tr><td>15</td><td>750</td></tr> <tr><td>16</td><td>520</td></tr> <tr><td>17</td><td>300</td></tr> <tr><td>18</td><td>100</td></tr> <tr><td>6 ó 19</td><td>20</td></tr> <tr><td>1-5 y 20-24</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Hora	Radiación (w/m ²)	7	120	8	350	9	600	10	750	11-14	1050	15	750	16	520	17	300	18	100	6 ó 19	20	1-5 y 20-24	0
Hora	Radiación (w/m ²)																									
7	120																									
8	350																									
9	600																									
10	750																									
11-14	1050																									
15	750																									
16	520																									
17	300																									
18	100																									
6 ó 19	20																									
1-5 y 20-24	0																									
Rangos tomados del IDEAM y ajustados para la zona de trabajo según los datos reportados por las estaciones meteorológicas.																										
Radiación global acumulada diaria	$RG_{acum} = \text{Radiación global acumulada entre las 7 y las 18 horas}$ $1000 < RG_{acum} < 8000$	(12)																								

Fuente: IDEAM

Nota1: Los subíndices en las variables indican la hora a la que corresponde la lectura.

Nota2: cuando la evaluación corresponde a un criterio que evalúa el comportamiento de la variable a lo largo del día y este no se cumple se etiquetó como sospechoso el día completo.

Para la selección del periodo de datos a analizar se tuvieron en cuenta los datos disponibles de meteorología y calidad de aire de las diferentes estaciones del SEVCA_ZCC y se calcularon los porcentajes de representatividad de cada variable medida en cada estación meteorológica y de calidad de aire. De acuerdo con los porcentajes de representatividad se seleccionaron las estaciones

meteorológicas que presentaran las mejores representatividades para periodos con información simultánea de calidad de aire.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ZCC Y ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES ENTRE ESTAS.

3.2.1 Definición de periodos meteorológicos

El impacto de la precipitación en el comportamiento de las variables meteorológicas y en los niveles de material particulado en el ambiente es ampliamente reconocido, es por esto que se seleccionó esta variable como una de las determinantes ambientales para estudiar el comportamiento meteorológico de la zona.

Para el desarrollo de esta etapa fueron visualizadas las series de tiempo de precipitación de las estaciones meteorológicas disponibles para el periodo de análisis seleccionado, identificando intervalos de tiempo con precipitaciones similares con el fin de disminuir la variabilidad de los datos.

3.2.2 Comportamiento horario de las variables meteorológicas durante los periodos meteorológicos.

Identificados los periodos se procedió a realizar un análisis del comportamiento horario de los datos. Para esto dependiendo del tipo de variable se emplearon diagramas de cajas, rosas de viento, rosas probabilísticas, gráficos de dispersión de datos entre variables, entre otros.

Las variables de tipo escalar precipitación, radiación, temperatura y humedad relativa fueron analizadas mediante diagramas de cajas para cada hora y periodo meteorológico. En estos se identificaron las horas donde se presentan los mayores y menores valores de las variables, además de la variabilidad de los datos y sus rangos.

Para la variable vectorial (velocidad del viento) se construyeron rosas de vientos y probabilísticas para cada periodo. Adicionalmente para estudiar el comportamiento de los vientos durante el transcurso del día se generaron rosas de viento y probabilísticas para intervalos de horas en cada periodo.

Por otra parte se observó el comportamiento de los datos para cada uno de los días del periodo con el propósito de verificar los patrones sugeridos por los análisis estadísticos.

3.2.3 Comportamiento diario de las principales variables meteorológicas.

Debido a que la medición de material particulado tiene resolución temporal diaria, es necesario estudiar el comportamiento de las variables meteorológicas para este intervalo de tiempo. Para este análisis se generó un gráfico integrado de las principales variables meteorológicas que permitiera observar el comportamiento de las variables en el periodo analizado y su posible relación con los diferentes periodos meteorológicos seleccionados, con el pleno conocimiento de las variabilidades durante el día.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y TSP EN LA ZCC Y ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES ENTRE ESTOS.

Para la caracterización espacial y temporal de los niveles de PM es de gran importancia estudiar el comportamiento de las concentraciones durante los meses del año, entender la relación entre TSP y PM₁₀ además del comportamiento de su distribución espacial. Con el propósito de entender el comportamiento de las niveles de PM en la zona, se construyeron diagramas de cajas para cada uno de los meses de la serie de tiempo de las variables TSP y PM₁₀ por estación. Posteriormente estos gráficos fueron consolidados por meses para observar el comportamiento general de cada uno de los meses en el periodo de estudio.

Adicionalmente se calcularon promedios móviles trimestrales para las concentraciones.

Se evaluó el comportamiento de la relación existente entre TSP y PM_{10} , para esto se graficaron las concentraciones de PM_{10} vs TSP para las estaciones que miden simultáneamente estos parámetros y se ajustó un modelo de regresión lineal para cada estación y periodo meteorológico.

Con base en los resultados de los apartados anteriores se procedió al análisis e interpretación de los datos identificando las épocas y estaciones con mayores concentraciones, las estaciones y variables con mayores correlaciones y analizando las posibles causas de similitudes y diferencias entre los resultados.

3.4 ASOCIACIÓN DE SITIOS DE MEDICIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS A ESTACIONES DE CALIDAD DE AIRE.

La asociación de un comportamiento meteorológico a las estaciones de calidad de aire es de gran importancia debido a que esto permite relacionar estos dos conjuntos de variables y determinar el impacto de la meteorología en los niveles de PM. Para determinar la mejor asociación se han contemplado tres elementos, la distancia entre las estaciones de aire y meteorológicas, relación entre precipitación y los niveles de PM y relación entre velocidad y dirección del viento con las concentraciones de PM. Las relaciones entre PM y variables meteorológicas fueron analizadas para todo el periodo de estudio y para la época seca (enero y febrero).

Adicionalmente la cartografía de la zona fue actualizada con el objeto de identificar la posición actual de los proyectos mineros y su localización respecto a las estaciones de calidad de aire. Para esto se georreferenció una fotografía aérea de la zona capturada en julio de 2011.

3.4.1 Distribución espacial de las estaciones de calidad del aire respecto a las estaciones meteorológicas y las principales fuentes.

Con el objeto de caracterizar la distribución espacial de las estaciones de aire respecto a las meteorológicas se procedió a la determinación de las distancias entre estas. Para esto se georreferenciaron las estaciones de calidad de aire y las meteorológicas según coordenadas reportadas por el SEVCA_ZCC y se determinó la distancia euclidiana entre las estaciones a través de medición directa sobre la cartografía. Solo fueron determinadas las distancias entre la estación de aire y las meteorológicas más cercanas. La información cartográfica para la zona permite estimar que el error de estas mediciones no es mayor a 10 metros. Además se determinó la distancia entre las estaciones de calidad de aire y las principales fuentes generadoras de PM.

3.4.2 Relación entre precipitación y concentración de PM en una combinación de estaciones de calidad de aire con estaciones meteorológicas

Debido a la importante relación existente entre precipitación y concentración de PM en el aire, este aspecto se consideró para la selección de la meteorología representativa para las estaciones de calidad de aire. Para evaluar esta relación se redujo la variabilidad de la precipitación, mediante el análisis de los acumulados de precipitación mensual con las concentraciones promedio mensuales de PM (aritmético para PM_{10} y geométrico para TSP) acompañadas de sus desviaciones estándar. Para observar las tendencias se graficaron estos datos como concentración vs precipitación y se calcularon promedios sectorizados en intervalos constantes de precipitación (10 mm sobre la abscisa) de los conjuntos de variables. A los resultados les fue ajustado el modelo de regresión lineal de la ecuación (13). La significancia del ajuste fue evaluada a través del coeficiente de correlación. También fue explorada la relación de la concentración con el número de días de precipitación en el mes.

$$C = \alpha R_{acm} + C_i \quad (13)$$

C = Concentración de PM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 R_{acm} = Precipitación acumulada mensual [mm]
 C_i = Coeficiente de ajuste [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 α = Coeficientes para el ajuste de los datos. [$\mu\text{g}/\text{m}^4$]

Por otra parte se determinó un modelo matemático para describir el fenómeno de deposición húmeda considerando precipitación acumulada diaria y concentración promedio diaria. Se calcularon promedios sectorizados por precipitación en intervalos constantes (5 mm sobre la abscisa) para el conjunto de variables y a los resultados les fue ajustado el modelo matemático (15), el cual fue desarrollado a partir de la ecuación (13) basada en correlaciones de deposición húmeda existentes para aerosoles. La significancia del ajuste fue evaluada a través del coeficiente de correlación.

$$\frac{dC}{dt} = -\Lambda t, \text{ Sabine Banzhaf - 2009} \quad (14)$$

$$\bar{C} = \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} * (1 - e^{-\alpha R_{ac}}) + C_o \quad (15)$$

Λ = Coeficiente de correlación

t = Tiempo

\bar{C} = Concentración promedio de PM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

α = Coeficiente de relajación de la curva [1/mm]

C_i = Coeficiente de ajuste [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

C_o = Concentración base [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

R_{ac} = Precipitación acumulada diaria [mm]

3.4.3 Relación de concentración con velocidad y dirección del viento

Para evaluar la relación de la concentración con la velocidad y dirección del viento, se generaron gráficos de dispersión de puntos. Para evaluar la tendencia,

se realizaron promedios sectorizados por velocidad y dirección del viento en intervalos homogéneos sobre la abscisa (1m/s, 30° respectivamente) de los conjuntos de variables.

Debido a que los datos de concentración tienen resolución temporal diaria, la meteorología debe ser consolidada a esta escala temporal y como se señaló en el numeral 3.1 la velocidad debe ser promediada vectorialmente.

Los promedios vectoriales pueden no representar lo ocurrido en el día. Por ejemplo, si se presentaron velocidades de baja magnitud provenientes de una dirección para varias horas del día pero existen algunas velocidades de altas magnitudes desde una dirección contraria, el promedio vectorial presentará direcciones que en realidad correspondieron sólo a unas horas del día o incluso podría representar direcciones de las cuales no se registraron velocidades en la resolución horaria. Por otra parte altas concentraciones pueden estar asociadas a estos vectores resultantes lo que puede generar confusión.

Con el objeto de evaluar el impacto de los promedios vectoriales para cada una de las estaciones se identificaron las fuentes de PM más probables y se determinó sobre la cartografía (2011) el intervalo angular de influencia respecto al norte de cada una de las fuentes más probables. Con esta información se calculó la dirección ponderada del viento respecto a las posibles fuentes. La dirección ponderada fue calculada de la siguiente forma:

El intervalo angular de incidencia de la fuente fue dividido en 9 sectores, el factor de ponderación corresponde a una función escalonada con máximo en el intervalo 5 y disminuye simétricamente hasta los límites del intervalo angular. De esta forma se pretendió eliminar variabilidad en la dirección dándole mayor importancia a las direcciones que se encuentren en el intervalo de incidencia de la fuente a la estación.

Evaluado el impacto de los promedios vectoriales se construyeron los gráficos para concentración y flujo (concentración * velocidad); estos fueron analizados simultáneamente en busca de patrones y comportamientos que permitieran identificar relación entre las variables y las direcciones de mayores y menores concentraciones. Adicionalmente este análisis fue realizado para el periodo seco.

Con el propósito de evaluar la concordancia de la asignación realizada, se construyeron calendarios de concentraciones en los cuales los niveles de PM fueron representados por el fondo de la celda y la dirección y velocidad del viento se representaron mediante la flecha dentro de cada celda.

3.5 ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES ENTRE VARIABLES METEOROLÓGICAS Y NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO.

Con el propósito de establecer la relación entre las estaciones localizadas en la zona se graficaron las concentraciones para cada una de las estaciones de calidad de aire con las de las demás estaciones y fue calculado el coeficiente de correlación de Pearson para determinar la fortaleza de la relación. Esto fue realizado para cada periodo meteorológico.

Por otra parte se estudió la relación entre concentración de MP y radiación solar global para varias estaciones de calidad de aire localizadas a diferentes distancias de las principales fuentes.

4. RESULTADOS

4.1 EVALUACIÓN DE DATOS EXISTENTES Y SELECCIÓN DE PERIODO DE ANÁLISIS

Para el desarrollo de esta etapa se estructuró una base de datos para estandarizar y consolidar la información almacenada por el SEVCA_ZCC. Además se implementaron los algoritmos necesarios para realizar la evaluación de consistencia de los datos según lo propuesto en el modelo conceptual presentado en la Figura 11 y los criterios de evaluación de la Tabla 4. Posteriormente se realizó la revisión de coherencia de los datos y una validación final donde se integran los resultados de las dos etapas anteriores, generando los datos evaluados a partir de los cuales se seleccionaron las estaciones con mayores registros para el periodo de estudio 2009 - 2011.

4.1.1 Estructuración de una base de datos y evaluación de datos meteorológicos

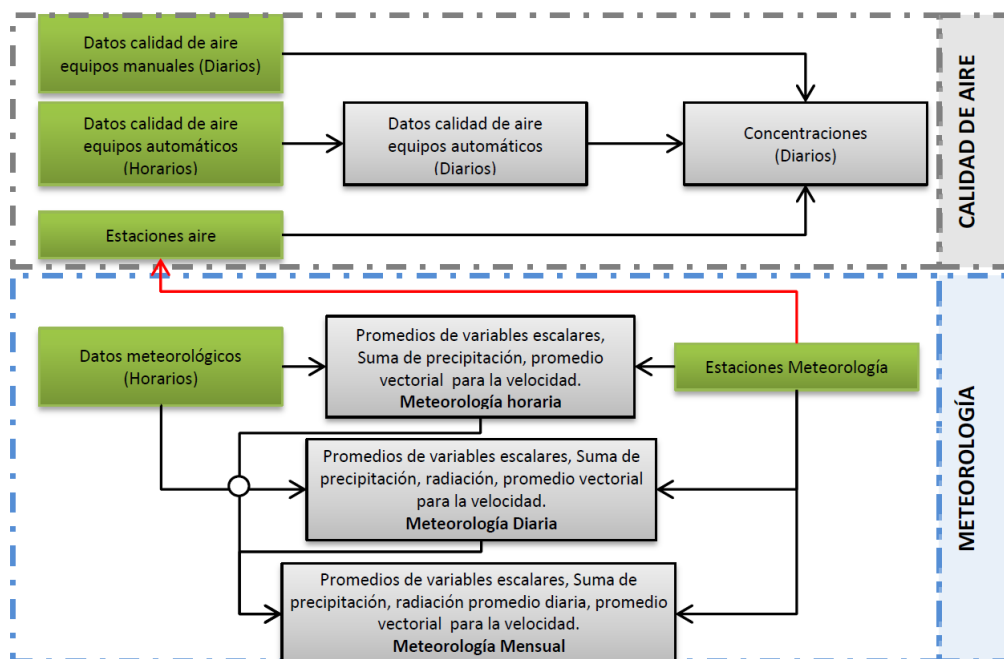


Figura 12 Modelo lógico de la base de datos
 Fuente: El Autor

Con el fin de consolidar, estructurar e integrar toda la información colectada por el SEVCA_ZCC se desarrolló una base de datos según el modelo lógico presentado en la Figura 12 y los parámetros de agrupación de la Tabla 5 en el manejador My SQL para el almacenamiento de todos los datos colectados durante la operación, la integración de información de calidad de aire generada por equipos manuales y automáticos e información meteorológica.

Tabla 5 Consolidación de información a mediciones horarias, diarias y mensuales

Nombre de la Variable	Hora	Día	Mes
Temperatura	Promedio	Promedio	Promedio
Temperatura máxima	Máximo	Máximo	Máxima de los registros diarios
Temperatura mínima	Mínimo	Mínimo	Mínima de los registros diarios
Humedad relativa	Promedio	Promedio	Promedio
Presión	Promedio	Promedio	Promedio
Precipitación	Suma	Suma	Suma
Radiación solar global	Promedio	Suma	Promedio de los registros diarios
Radiación solar máxima	Máximo	Máximo	Máxima de los registros diarios
	Promedio vectorial	Promedio vectorial	Promedio vectorial
Velocidad del viento	$\vec{v}_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^N - \vec{V}_i * \text{Cos} \varphi_i}{N} \quad (4-1)$ $\vec{u}_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^N - \vec{V}_i * \text{Sen} \varphi_i}{N} \quad (4-2)$ $V_{promedio} = \sqrt{(u_{Promedio}^2 + v_{Promedio}^2)} \quad (4-3)$ $\varphi_{promedio} = 90 - \left(\frac{180}{\pi}\right) * \text{arctg} \frac{v_{Promedio}}{u_{Promedio}} + \alpha \quad (4-4)$ <p>Donde: $\alpha = 0^\circ$ si $\vec{u}_{promedio} < 0$ $\alpha = 180^\circ$ si $\vec{u}_{promedio} \geq 0$</p>		

Nombre de la Variable	Hora	Día	Mes
	$\bar{u}_{Promedio}$ = Promedio de la componente zonal del viento (x) $\bar{v}_{Promedio}$ = Promedio de la componente meridional del viento (y) N = Número de datos $V_{Promedio}$ = Magnitud de la velocidad resultante $\phi_{promedio}$ = Dirección del viento respecto al norte y en sentido de las agujas del reloj (Benavides, 2010 citando a Ruiz, 1998)		

Fuente: El Autor

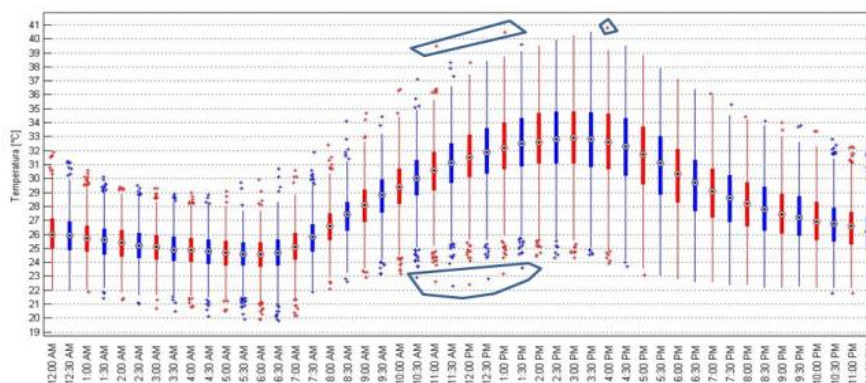
Posteriormente se implementan los algoritmos para la evaluación de consistencia según los criterios presentados la Tabla 4.

4.1.2 Evaluación de datos meteorológicos

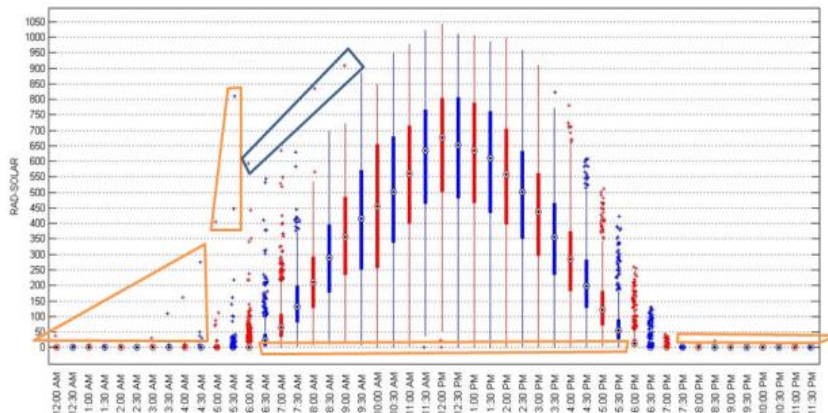
En el desarrollo de esta etapa se implementó el modelo planteado en la Figura 11 realizando la evaluación visual (coherencia) y posteriormente la evaluación automática (consistencia).

- **Evaluación de coherencia**

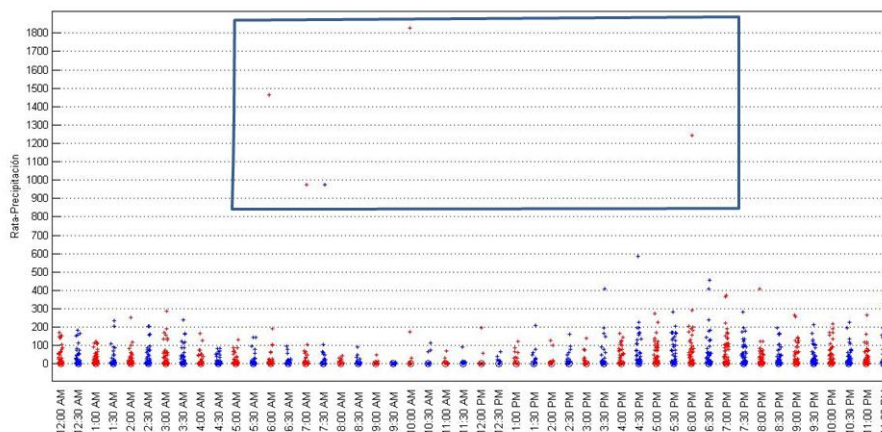
La primera actividad correspondió a la verificación de coherencia o rango de los datos corroborando que todos los datos almacenados estuviesen en las mismas unidades y que los valores reportados se encontraran dentro del intervalo de valores posibles de la variable. Para esto se generaron gráficos de caja horarios para cada variable de cada estación. En estos gráficos se identificaron datos sospechosos o fuera del valor posible de la variable los cuales fueron etiquetados con una bandera por variable.



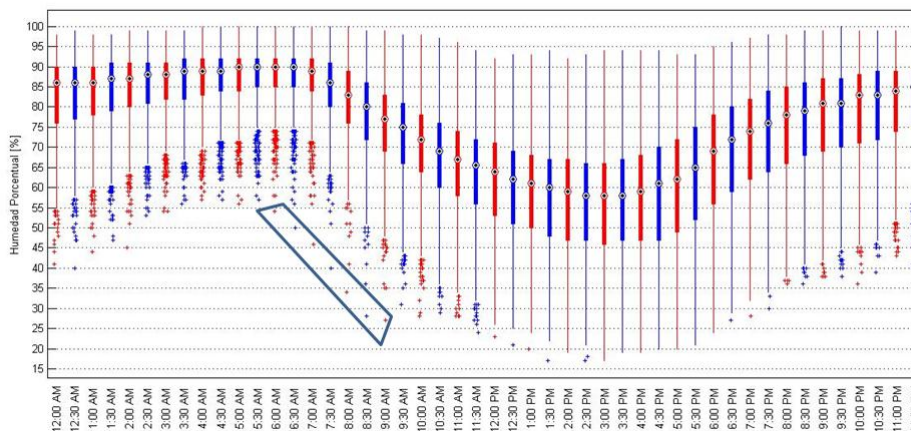
a) Diagrama de cajas del comportamiento horario de la temperatura [°C]



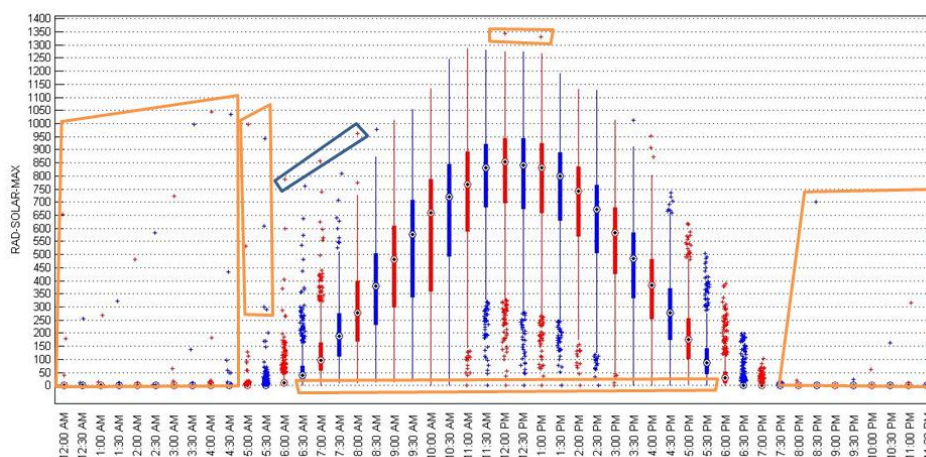
b) Diagrama de cajas del comportamiento horario de la radiación solar global [w/m²]



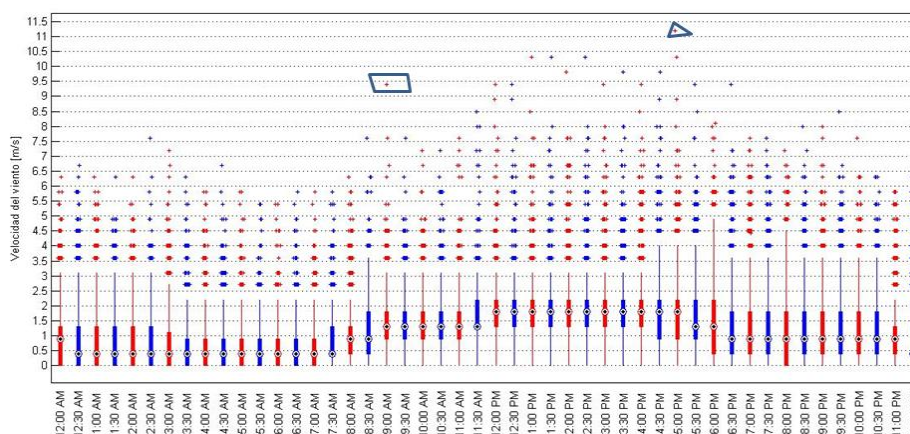
c) Diagrama de cajas del comportamiento horario de la tasa de precipitación [mm/h]



d) Diagrama de cajas del comportamiento horario de la humedad relativa [%]



e) Diagrama de cajas del comportamiento horario de la radiación solar global máxima [w/m^2]

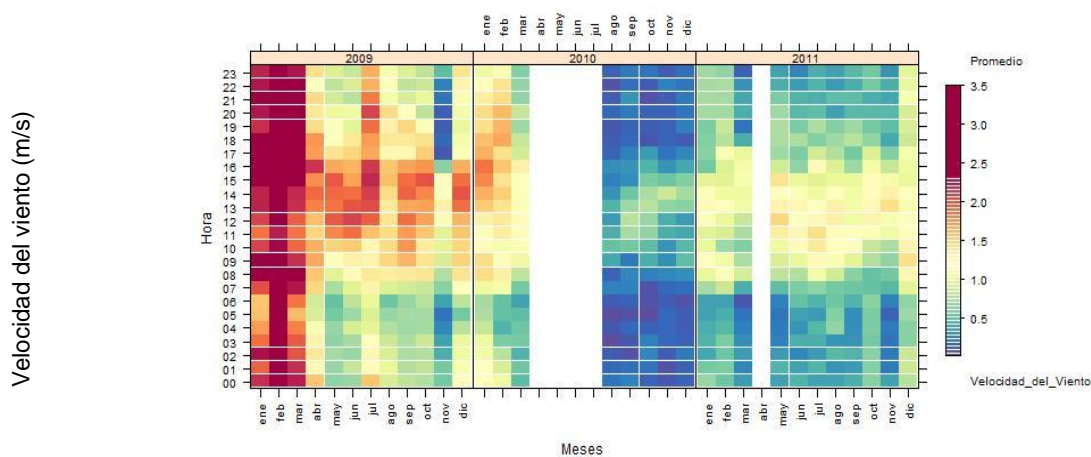


f) Diagrama de cajas del comportamiento horario de la velocidad del viento [m/s]

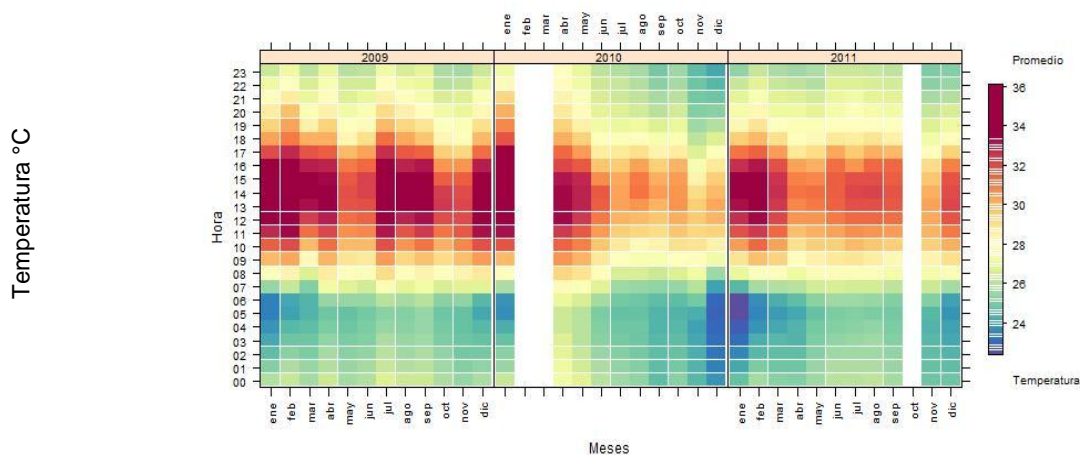
Figura 13 Evaluación visual de datos e identificación de datos sospechosos estación Borrego
Fuente: El autor

- **Evaluación de consistencia**

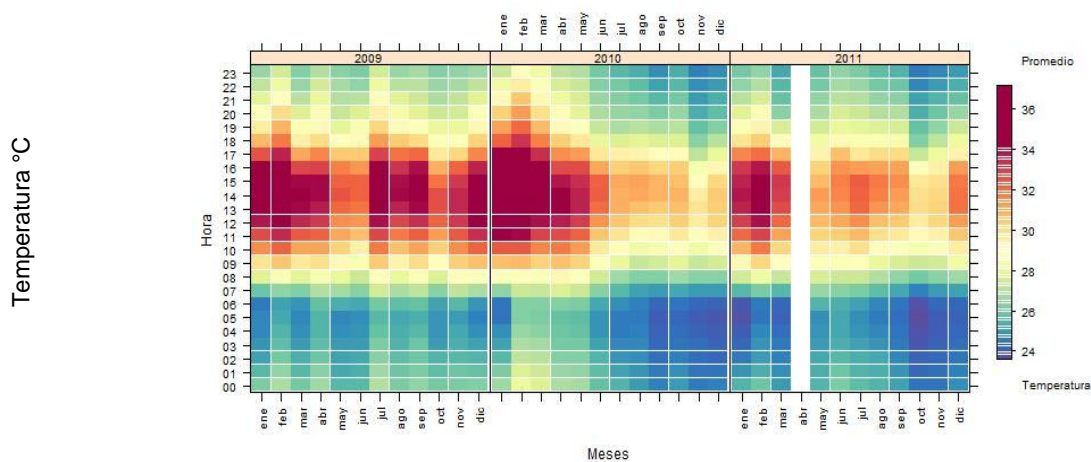
Para la evaluación de consistencia se utilizaron los algoritmos implementados en la base de datos descrita en el numeral 4.1.1 según los criterios planteados por el IDEAM para la evaluación de datos meteorológicos a nivel nacional. Las variables evaluadas fueron temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad y radiación.



b) Comportamiento de la velocidad del viento promedio mes hora Calenturitas



c) Comportamiento de la temperatura promedio mes hora Borrego



d) Comportamiento de la temperatura promedio mes hora Calenturitas

Figura 16 Comportamiento promedio mensual por horas para algunas variables meteorológicas
Fuente: El Autor

Por otra parte para la estación meteorológica La Francia IDEAM se encontraron datos muy bajos de radiación en las primeras horas de la mañana en comparación con las demás estaciones de la zona. Estos hallazgos evidenciaron problemas con la calibración del cero del piranómetro por lo cual se decidió realizar la verificación en campo mediante la intercomparación de sensores colocalizados.

En la Figura 17 se presenta el registro fotográfico de la campaña de intercomparación realizada.



a) Estación meteorológica del IDEAM La Francia IDEAM

b) Verificación de desempeño del piranómetro de la estación La Francia IDEAM

Figura 17 Campaña de intercomparación de piranómetros estación La Francia IDEAM
Fuente: SEVCA_ZCC

La Figura 18 presenta los resultados de la intercomparación de los piranómetros confirmándose la existencia de problemas con la calibración del cero de la estación meteorológica del IDEAM. Se calculó una ecuación de equivalencia para la corrección de los valores de radiación de esta estación (Figura 19). Sin embargo, solo es posible reconstruir los datos de radiación entre 09:00 y 16:00 debido a que el valor reportado por el sensor de la estación La Francia IDEAM para horas por fuera de este intervalo es cero.

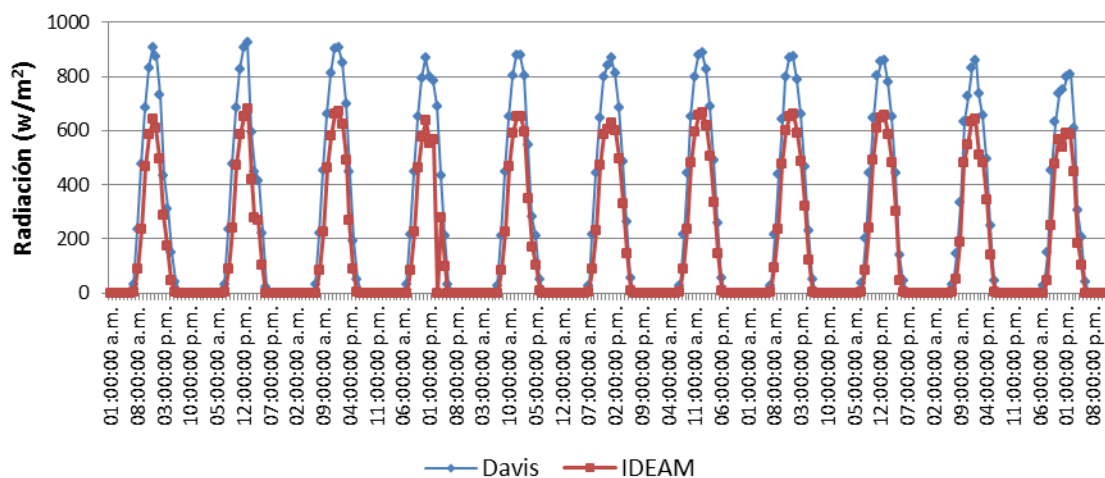


Figura 18 Intercomparación de sensores de radiación solar
 Fuente: El autor

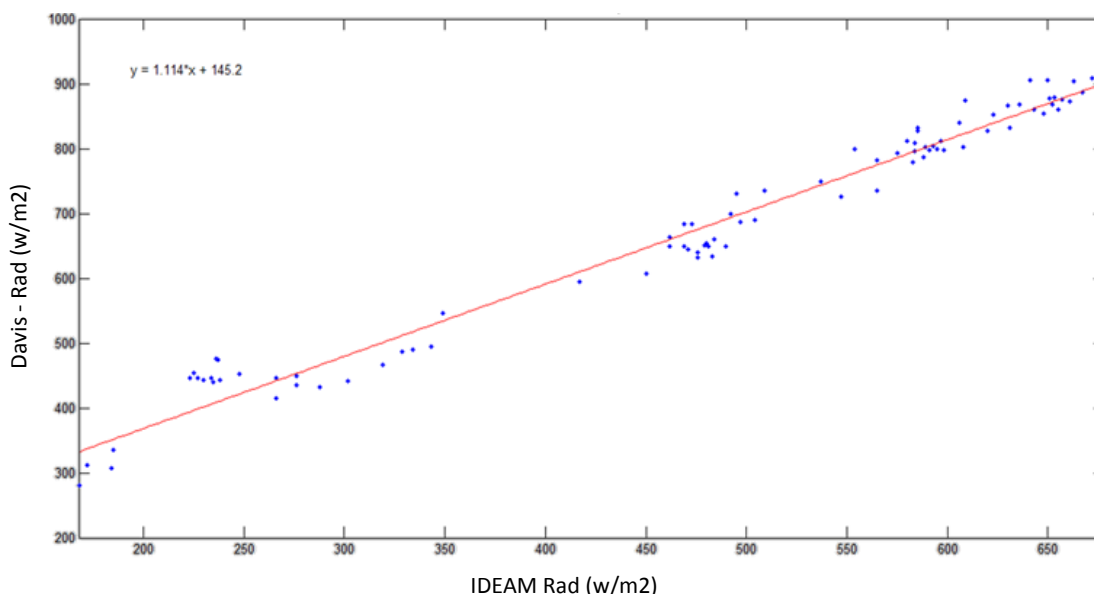


Figura 19 Ecuación de equivalencia para la corrección de radiación solar estación La Francia IDEAM
 Fuente: El autor

Realizadas las actividades de verificación se generó la tabla con las mediciones meteorológicas evaluadas para cada una de las variables. La Figura 20 en la

ordenada presenta el número de registros válidos, inválidos y no capturados de cada variable en las principales estaciones meteorológicas en donde los números indican el código de la estación meteorológica. La Figura 21 presenta los mismos datos de la Figura 20 expresados en porcentaje, los que son calculados tomando como referencia el número de datos posibles que puede capturar cada estación con su configuración de intervalos de captura.

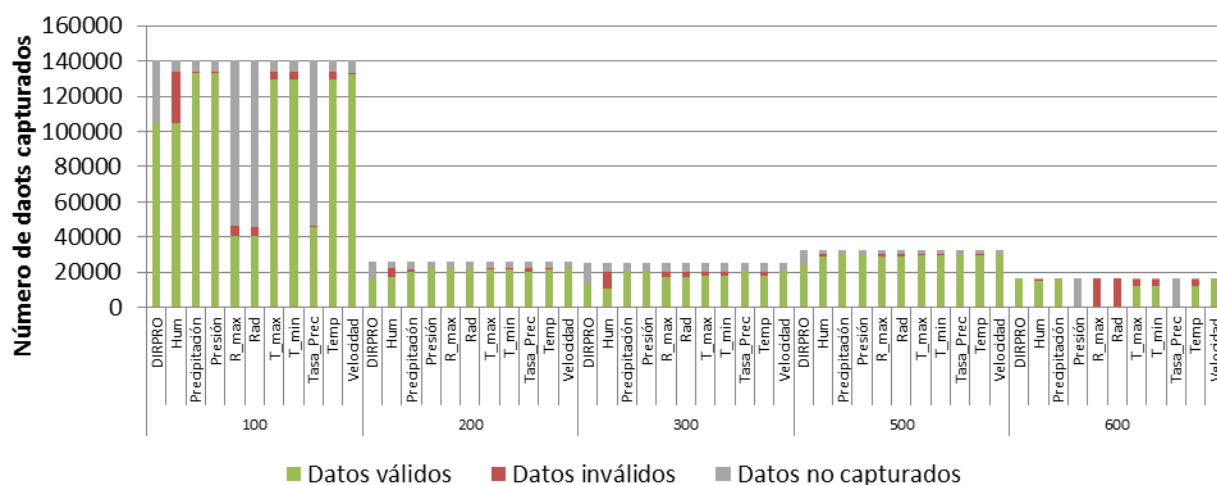


Figura 20 Número de datos por variable para las estaciones representativas
Fuente: El autor

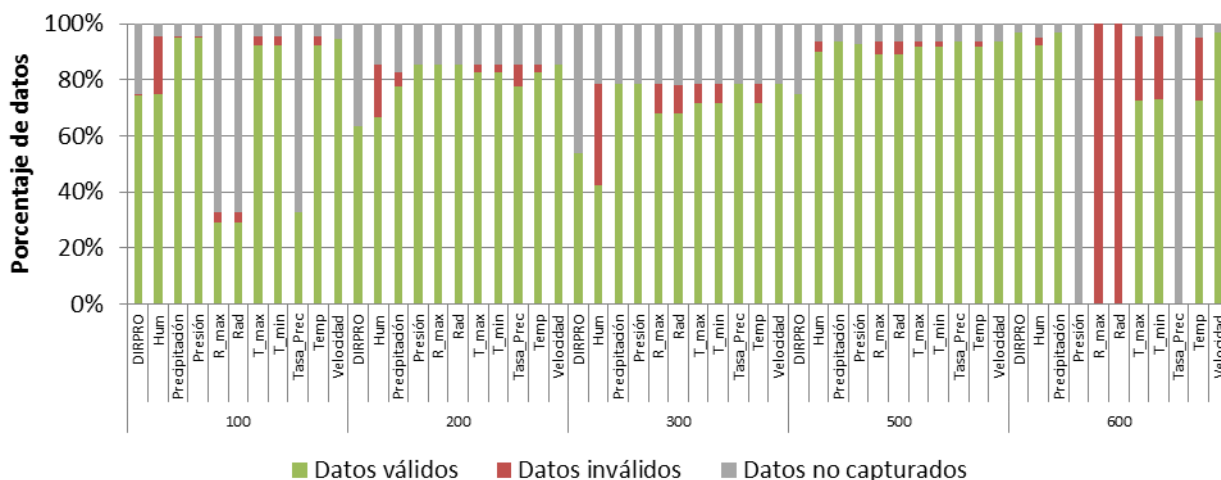


Figura 21 Porcentaje de datos por variable para las estaciones representativas
Fuente: El autor

4.1.3 Selección de las estaciones e intervalos de tiempo a estudiar.

El SEVCA_ZCC cuenta con información de calidad del aire desde mediados del año 2007, sin embargo el sistema se fue conformando con el paso del tiempo y para el 2008 solo las estaciones La Jagua Centro, Palmitas, Boquerón, Plan Bonito y Jagua Vía (PM₁₀) presentan representatividades superiores al 80%. Los porcentajes de representatividad para las variables medidas en las diferentes estaciones de calidad de aire y las estaciones seleccionadas se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Representatividad estaciones de calidad de aire

Código	Estación	Variable	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011	Total	Selección
1	Loma Centro	PM ₁₀	60%	65%	78%	65%	81%	69%	√
		TSP	41%	67%	73%	77%	80%	66%	√
2	Jagua Centro	PM ₁₀	59%	81%	90%	97%	96%	83%	√
		PM2.5	0%	0%	91%	55%	93%	44%	
		TSP	56%	81%	88%	95%	92%	82%	√
3	Loma 2	PM ₁₀	0%	0%	28%	73%	86%	33%	√
		TSP	0%	35%	75%	78%	81%	51%	√
4	Palmitas	PM ₁₀	3%	82%	81%	90%	80%	66%	√
5	La Aurora	PM ₁₀	55%	66%	80%	81%	97%	74%	√
		TSP	35%	64%	73%	75%	91%	66%	√
6	Boquerón	PM ₁₀	0%	0%	0%	88%	82%	30%	√
		TSP	41%	80%	69%	92%	73%	71%	√
7	Plan Bonito	PM ₁₀	38%	84%	77%	86%	95%	74%	√
		TSP	43%	83%	81%	87%	93%	76%	√
9	Jagua Vía	PM ₁₀	40%	80%	81%	91%	83%	74%	√
		TSP	46%	77%	78%	88%	83%	73%	√
11	Minguillo	PM ₁₀	48%	79%	61%	72%	66%	65%	√
12	Rincón Hondo	PM ₁₀	47%	74%	62%	81%	77%	67%	√
		TSP	44%	69%	64%	73%	87%	65%	√
13	El Hatillo	PM ₁₀	0%	0%	39%	93%	92%	41%	√
		TSP	21%	72%	79%	89%	91%	69%	√
14	Estados Unidos	TSP	0%	17%	67%	63%	51%	39%	√
15	Chiriguana	PM ₁₀	34%	77%	86%	91%	98%	75%	√
16	Bosconia	PM1	0%	0%	32%	24%	0%	12%	
		PM ₁₀	0%	0%	32%	24%	0%	12%	
		PM2.5	0%	0%	32%	24%	0%	12%	
17	El Prado	PM ₁₀	0%	31%	70%	19%	44%	32%	
18	Norcarbón	PM ₁₀	0%	33%	89%	74%	45%	49%	
19	Becerril	PM ₁₀	0%	0%	25%	62%	86%	30%	√

Los años con representatividad del 50 – 75% se resaltan con celdas de color azul.
Los años con representatividad mayor al 75% se resaltan con celdas de color verde.

Fuente: El autor

Considerando la representatividad de los datos en las diferentes estaciones de calidad de aire, se seleccionó para el análisis el periodo 2009 – 2011. Las estaciones Bosconia, El Prado y Norcarbón no se seleccionaron por su baja representatividad y porque ya se encuentran fuera de operación.

En cuanto a la información meteorológica, la zona cuenta con 7 estaciones localizadas principalmente en los proyectos mineros, de estas, para el periodo 2007 -2008 solo la estación Borrego reporta datos y la estación Calenturitas inicia su operación a finales del primer semestre del 2008.

La selección de las estaciones meteorológicas fue realizada considerando su representatividad espacial, temporal y la simultaneidad con datos de calidad de aire. En la Tabla 7 se presenta el tiempo de operación de las estaciones meteorológicas y cuales de estas fueron seleccionadas para su estudio.

Tabla 7 Estaciones meteorológicas seleccionada

Cod_Estacion	Nombre	Fecha fin	Fecha Inicio	Tiempo de Operación (años)	Selección
100	Borrego	31/12/2011	01/01/1996	16	✓
200	Cerrolargo	31/12/2011	01/01/2009	3.0	✓
250	PLJ	31/12/2011	01/07/2011	0.5	
300	Descanso	31/12/2011	06/02/2009	2.9	✓
400	La Francia	30/09/2010	29/05/2009	1.3	
500	Calenturitas	31/12/2011	14/05/2008	3.6	✓
600	La Francia IDEAM	31/12/2011	09/03/2010	1.8	✓
700	Movil	30/11/2010	08/07/2010	0.4	
800	CMU	31/10/2010	01/01/2007	3.8	No operativa
900	Movil	31/01/2011	01/12/2010	0.2	
902	Jagua Centro	31/12/2011	20/12/2009	2.0	X
903	La Loma 2	31/12/2011	22/09/2009	2.3	
911	Minguillo	31/12/2011	29/08/2009	2.3	
912	Rincon Hondo	31/12/2011	22/09/2009	2.3	
915	Chiriguana	31/12/2011	31/08/2009	2.3	
919	Becerril	31/12/2011	30/09/2009	2.3	

Fuente: El autor

Las estaciones seleccionadas para el análisis fueron Borrego, Cerrolargo², Descanso, Calenturitas y La Francia IDEAM. La estación La Jagua centro aunque cuenta con dos años de operación desde su instalación no se seleccionó puesto que ha presentado múltiples interrupciones en sus mediciones.

En la Tabla 8 se presenta el porcentaje de datos capturados por cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas y por los pluviómetros durante el periodo 2008 – 2011. Las mediciones de los pluviómetros no se considerarán para el análisis puesto que iniciaron su operación a finales del 2009 y además presentaron problemas durante algunos meses.

Tabla 8 Representatividad de estaciones meteorológicas

Estación	2008				2009				2010				2011							
	100	200	300	500	600	903	911	912	915	919	100	200	300	500	600	903	911	912	915	919
2008-01	100%																			
2008-02	98%																			
2008-03	100%																			
2008-04	99%																			
2008-05	100%			57%																
2008-06	98%			97%																
2008-07	96%			100%																
2008-08	100%			98%																
2008-09	100%			95%																
2008-10	98%			100%																
2008-11	98%			100%																
2008-12	100%			100%																
2009-01	99%			100%																
2009-02	100%			100%																
2009-03	100%			97%																
2009-04	100%			100%																
2009-05	100%			100%																
2009-06	100%			100%																
2009-07	100%			97%																
2009-08	100%			100%																
2009-09	99%			75%																
2009-10	100%			75%																
2009-11	100%			63%																
2009-12	100%			88%																
2010-01	100%			100%																
2010-02	100%			99%																
2010-03	100%			100%																
2010-04	99%			100%																
2010-05	100%			100%																
2010-06	100%			100%																
2010-07	100%			100%																
2010-08	100%			0%																
2010-09	100%			0%																
2010-10	100%			100%																
2010-11	100%			100%																
2010-12	100%			0%																
2011-01	101%			99%																
2011-02	99%			100%																
2011-03	98%			56%																
2011-04	99%			100%																
2011-05	100%			93%																
2011-06	100%			100%																
2011-07	100%			100%																
2011-08	100%			100%																
2011-09	99%			0%																
2011-10	0%			100%																
2011-11	99%			97%																
2011-12	97%			100%																

Borrego (100), Cerrolargo (200), Descanso (300), Calenturitas (500), La Francia IDEAM (600)

Los años con representatividad del 50 – 75% se resaltan con celdas de color azul.

Los años con representatividad mayor al 75% se resaltan con celdas de color verde.

Fuente: El autor

² La variable viento para esta estación no es representativa debido a que las condiciones topográficas de la zona en inmediaciones de la estación canalizan los vientos.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ZCC Y ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES ENTRE ESTAS.

4.2.1 Definición de periodos meteorológicos

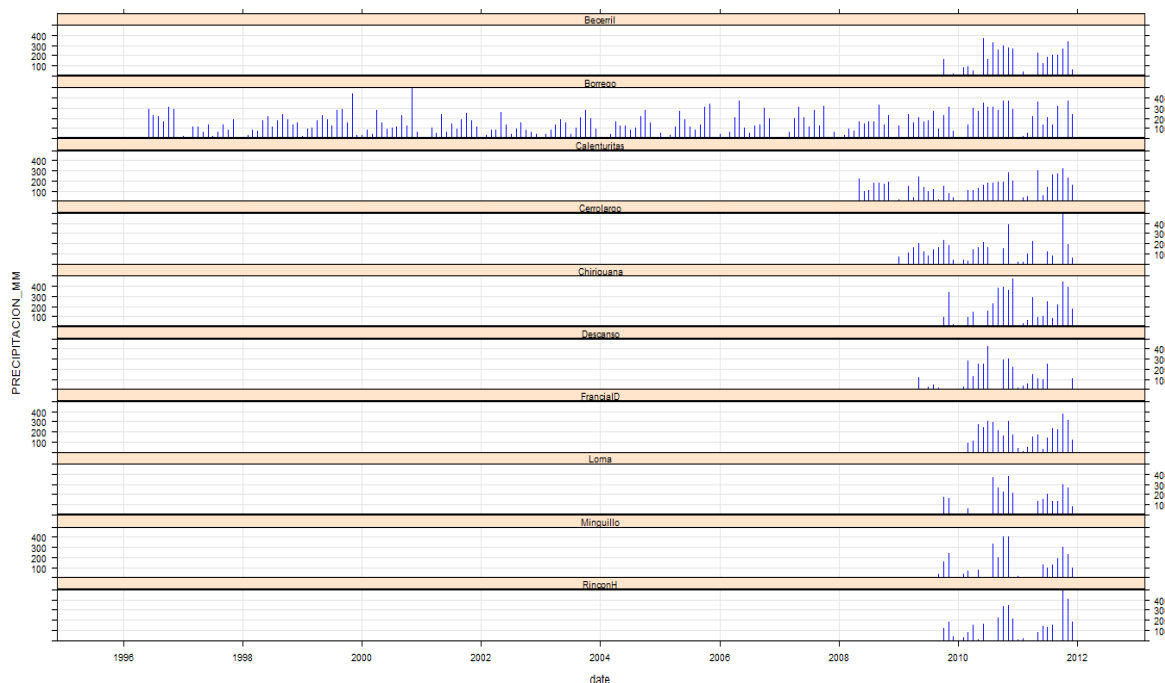


Figura 22 Series de tiempo de precipitación (mm)
Fuente: El autor

En la Figura 22 se presentan las series de tiempo de precipitación de las estaciones meteorológicas disponibles para la zona. Se observan importantes precipitaciones a lo largo de todo el año exceptuando los meses de enero y febrero. Por otra parte el indicador del estado del fenómeno del niño (ONI) Figura 23, muestran un niño importante entre mediados de 2009 y mediados de 2010 y una fuerte niña para el segundo semestre de 2010 y primer semestre de 2011. La presencia de estos fenómenos meteorológicos ejerce gran influencia sobre los datos.

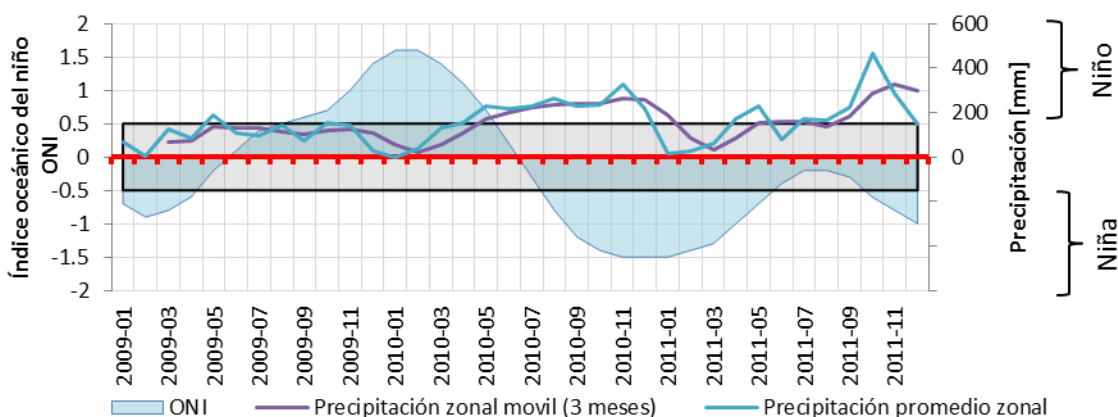


Figura 23 Comportamiento de ENSO. NOAA, 2012.
Fuente: NOAA, 2012

Considerando lo anterior y después de analizar varias alternativas, se determinó establecer un grupo para los meses de enero y febrero donde las precipitaciones son escasas y otros tres grupos para los meses de marzo a diciembre de cada año. La distribución de los periodos se presenta en la Figura 24.

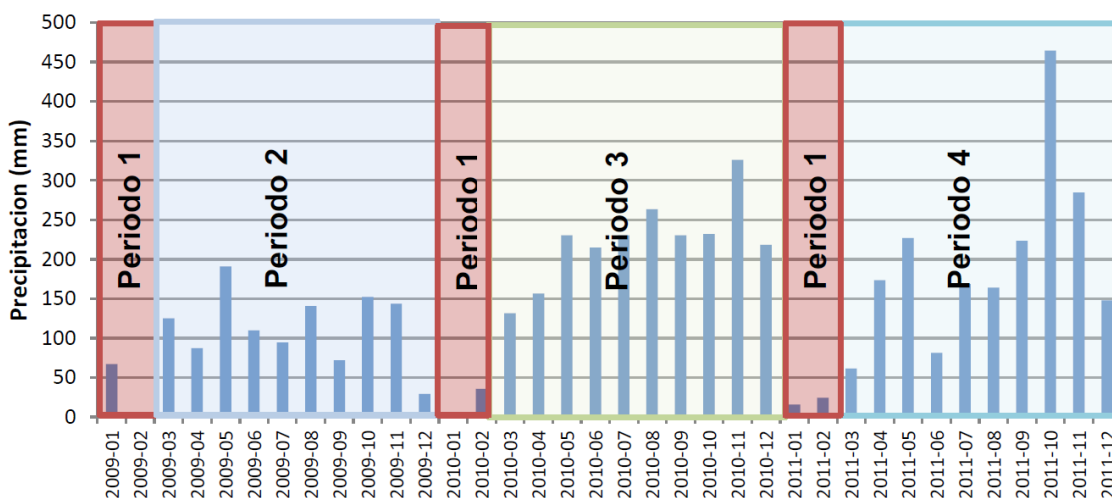


Figura 24 Precipitación acumulada mensual (promedio multianual de la zona, 2009-2011)
Fuente: El Autor

4.2.2 Comportamiento horario de las variables meteorológicas durante los periodos meteorológicos.

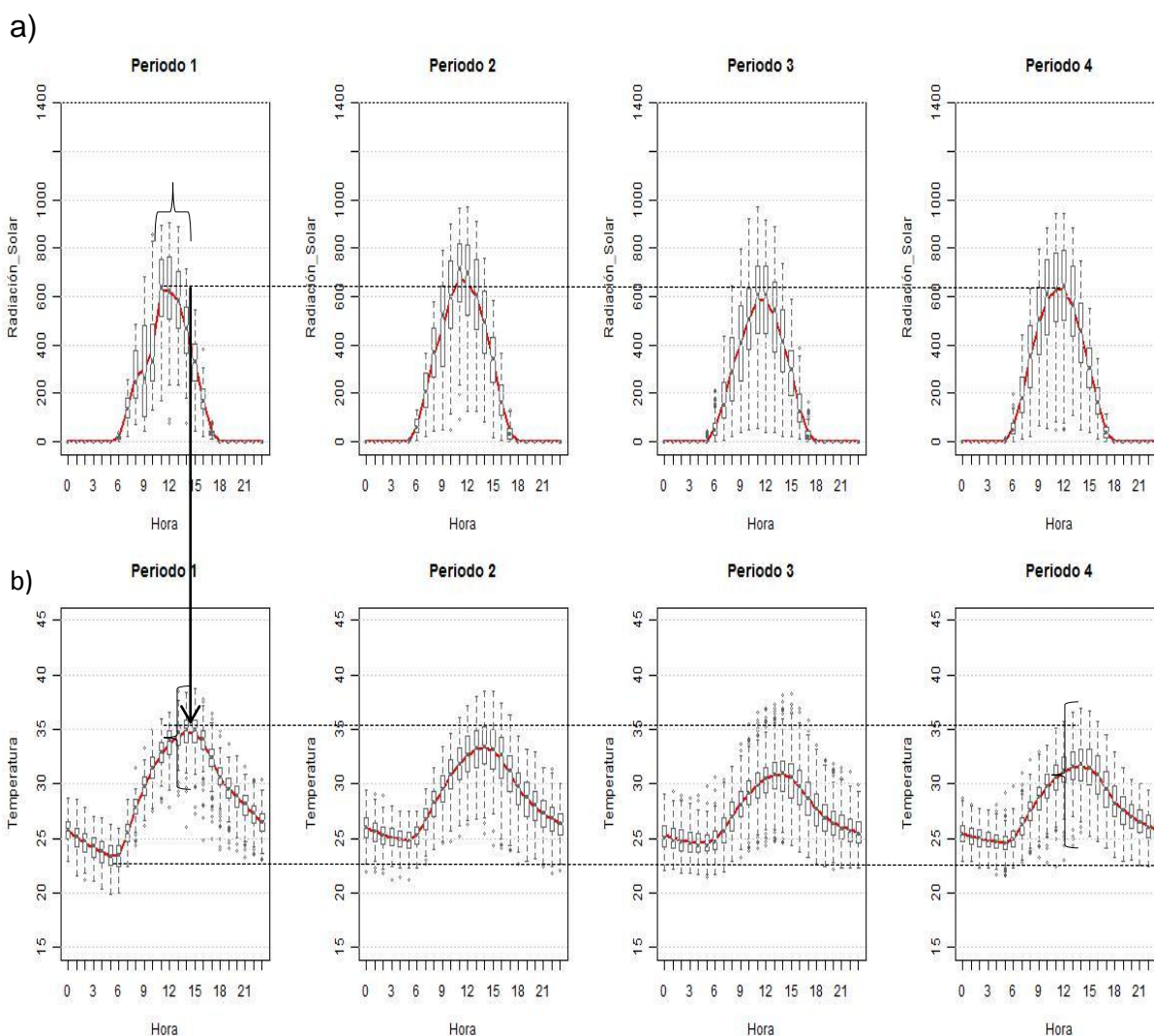
Al analizar las series de tiempo se observa un incremento de la humedad relativa con el paso del tiempo, esta situación puede estar relacionada con la variabilidad

climática generada por el efecto del niño y de la niña que se registraron durante el periodo de estudio. La zona está regida por una combinación de efectos sinópticos y térmicos, situación que genera gran variabilidad del comportamiento horario de los datos para los diferentes días, dependiendo de la época del año y de los fenómenos sinópticos, lo que hace que se presenten patrones diarios difíciles de predecir.

La precipitación en la zona se presenta principalmente finalizando la tarde y en las noches. Durante el periodo 1 generalmente no se registran precipitaciones y cuando se presentan ocurren entre las 15:00 y 18:00 horas. Durante el periodo 2 se presentaron menor número de eventos de precipitación pero de mayor intensidad que los registrados en los periodos 3 y 4. Para estos últimos periodos se registra un comportamiento similar, con la mayor frecuencia de eventos de precipitación en horas nocturnas pero con algunos eventos en horas diurnas.

Para la temperatura en general todas las estaciones registran comportamientos similares, las mayores y menores temperaturas del año se presentan cerca de las 14:00 y 06:00 horas respectivamente. En el periodo 1 se presentó el mayor rango de variación de temperatura, registrando las temperaturas más altas y también las más bajas. Las temperaturas altas se relacionan con la ausencia de nubosidad la cual es característica del periodo seco, sin embargo para este mismo periodo se observan radiaciones máximas menores, situación que será estudiada en detalle más adelante. La máxima radiación para todos los periodos se registra entre las 11:00 y 12:00 horas.

En la Figura 25 se presenta un ejemplo de los gráficos utilizados para el análisis del comportamiento de las variables meteorológicas. El conjunto completo de gráficas se presenta en el Anexo A en el numeral 1.2 de cada estación meteorológica.



En la gráfica (a) se observa la máxima radiación entre las 11:00 y 12:00 horas, durante este intervalo para el periodo 1 el límite inferior de la caja tiene mayor valor, lo que indica cielos despejados, además se observa un corrimiento entre la radiación máxima y la temperatura máxima de aproximadamente 3 horas. En la gráfica (b) el periodo 1 registra el máximo intervalo de variación (diferencia entre la temperatura mínima y máxima), para el primer periodo se registra la temperatura mínima a las 06:00 horas mientras que para los otros periodos este valor es registrado a las 05:00 horas.

Figura 25 Diagrama de cajas estación Borrego
Fuente: El Autor

El comportamiento registrado por el viento en la zona es complejo, la orografía y los fenómenos sinópticos juegan un papel crucial en la definición de los patrones meteorológicos. Los análisis estadísticos realizados mediante rosas de viento, probabilidad, diagramas de cajas, entre otros, sugieren predominancia de vientos

en dos direcciones simultáneamente con variaciones considerables a lo largo del día como se presenta en la Figura 26, Figura 27, Figura 28 y Figura 29; de lo anterior se puede inferir alta variabilidad en los patrones meteorológicos de la zona. Con el objeto de verificar lo anterior y establecer los principales patrones de vientos fueron graficadas para cada día las velocidades y dirección del viento en cada hora junto con la radiación y la precipitación.

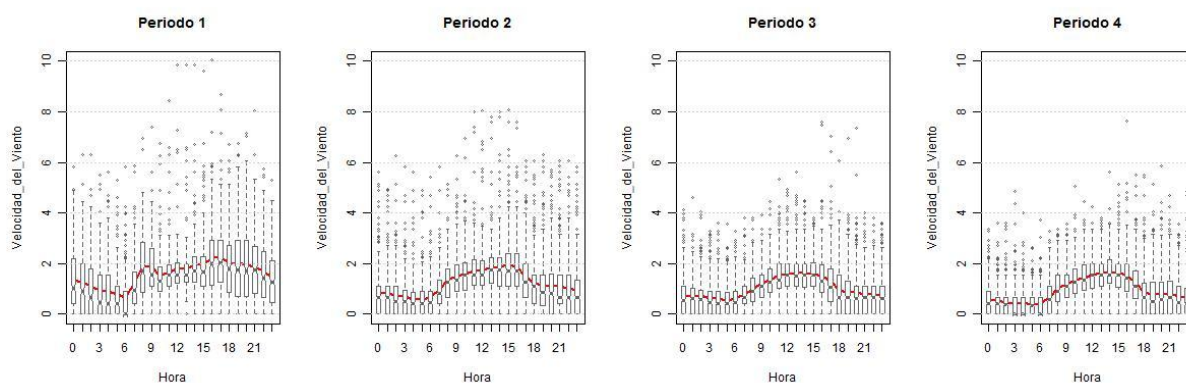
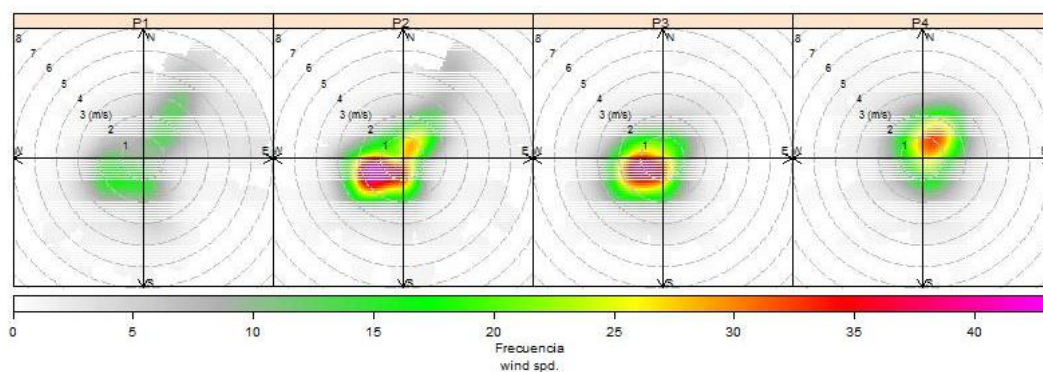
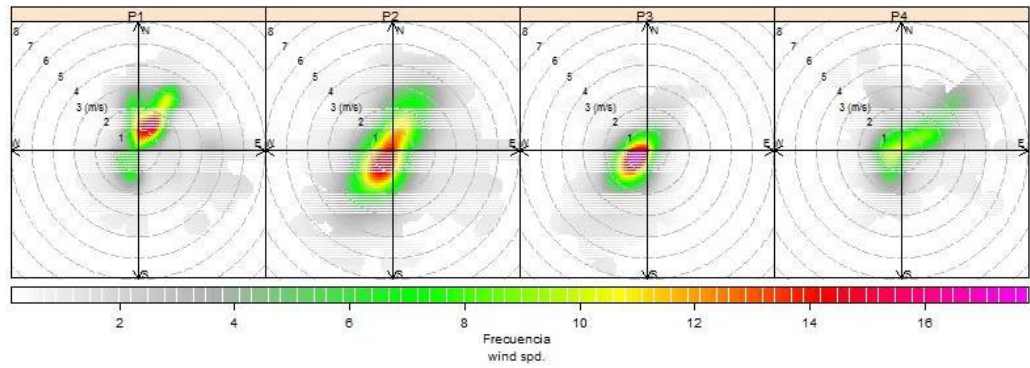


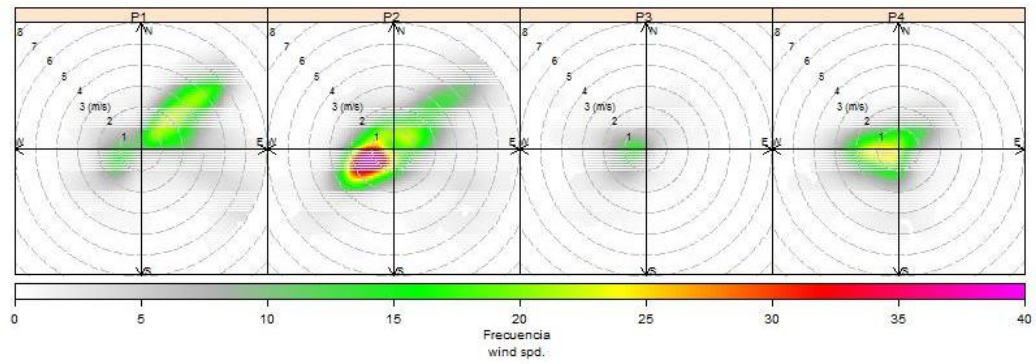
Figura 26 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Borrego
Fuente: El Autor



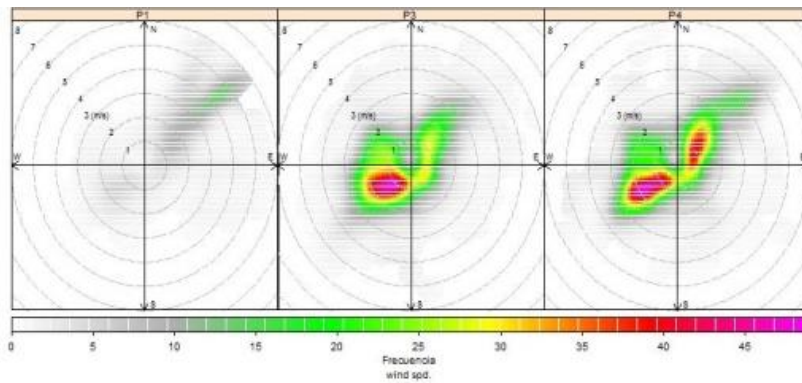
a) Borrego



b) Descanso



c) Calenturitas



d) La Francia IDEAM

Figura 27 Rosa de probabilidad por periodo
Fuente: El Autor

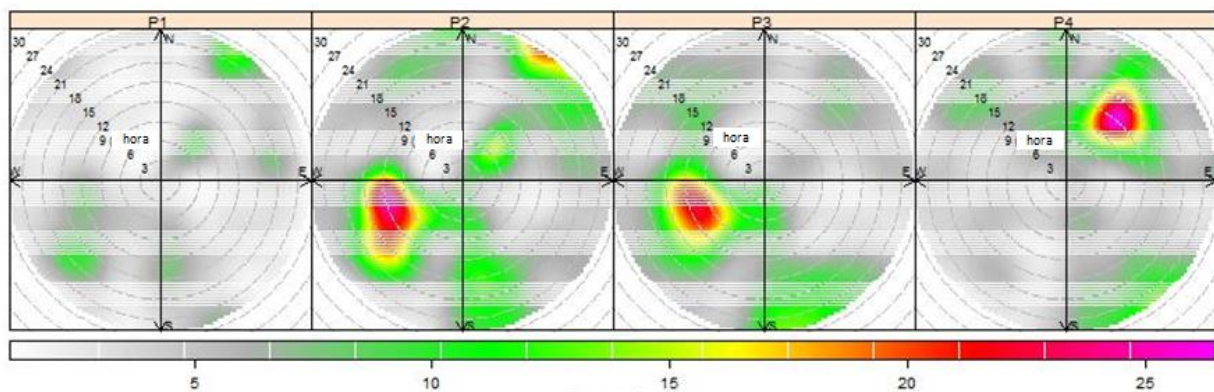


Figura 28 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Borrego
Fuente: El Autor

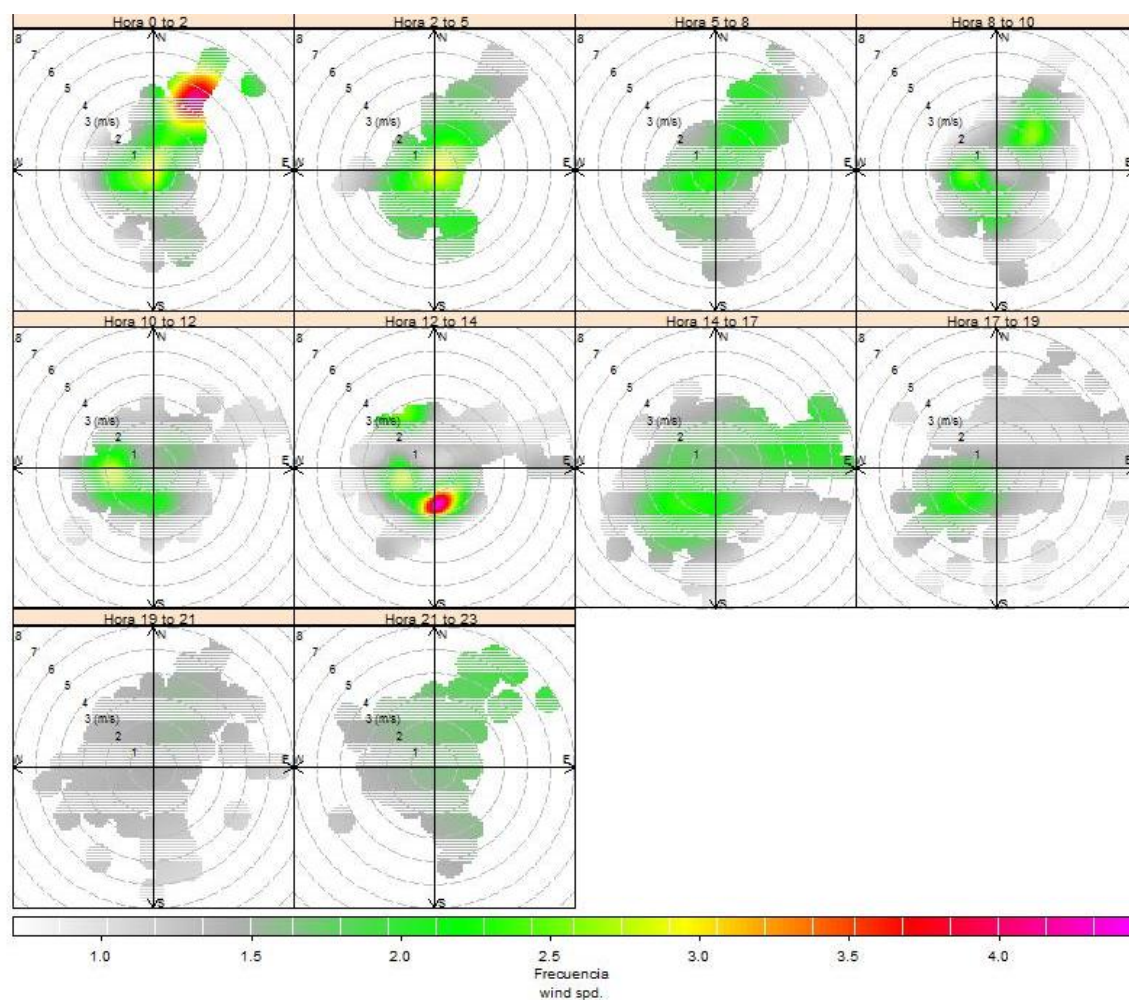


Figura 29 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Borrego
Fuente: El Autor

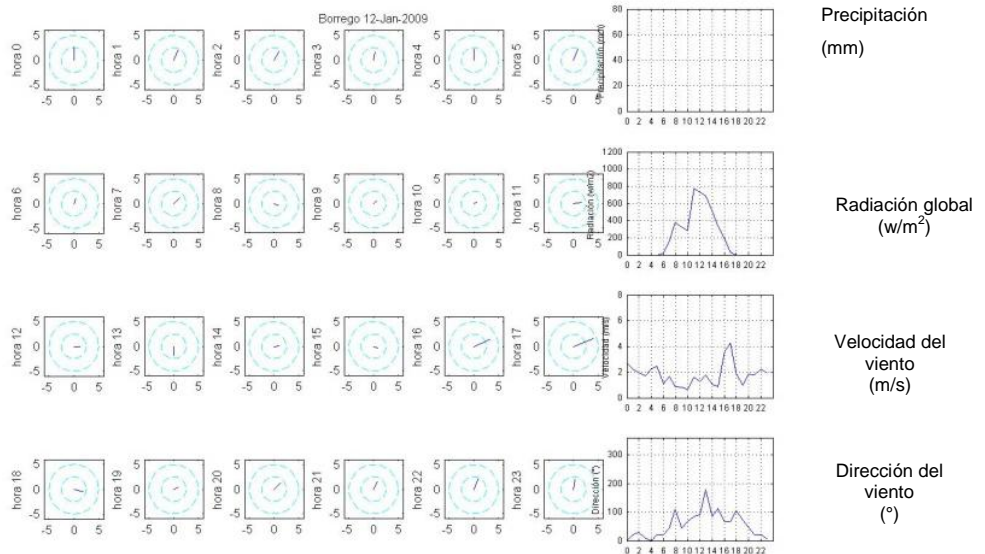
El conjunto completo de gráficas para cada una de las variables y estaciones se presenta en el Anexo A.

En la Figura 30 se presenta a modo de ejemplo el comportamiento diario de los días 12 y 13 de enero y 4 y 5 de marzo de 2009 para la estación Borrego. En ninguno de los días se presentaron eventos de precipitación.

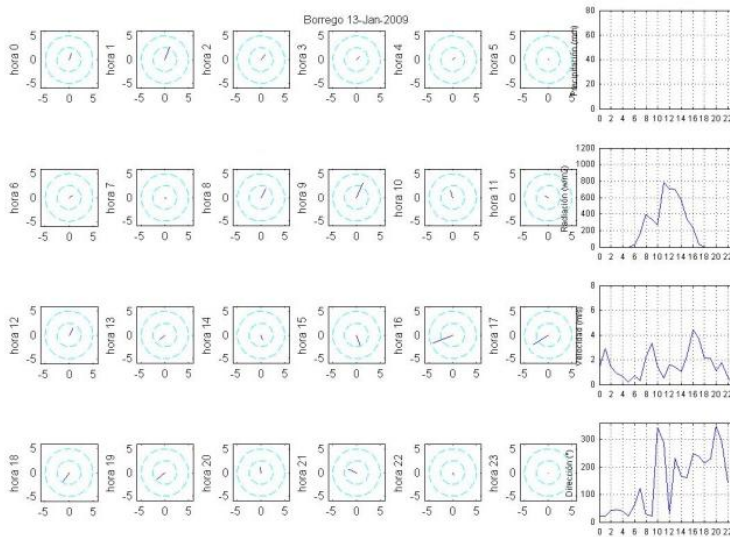
Para los días 12 y 13 de enero se presentan comportamientos similares de radiación solar, con máximos cercanos a $800 \text{ (W/m}^2\text{)}$ registrados a las 12:00 horas y un descenso en la radiación entre las 08:00 y 10:00 horas, lo que corresponde con los patrones sugeridos por el análisis estadístico, sin embargo, el comportamiento de la velocidad y dirección del viento presenta notables diferencias entre estos días. El 12 de enero entre las 00:00 y las 07:00 horas se presentaron vientos provenientes del N y NNE con velocidades cercanas a 2 m/s, mientras que para el día 13 de enero la velocidad inicia con valores cercanos a los 2 m/s pero empieza a disminuir hasta llegar a un mínimo de aproximadamente 0.5 m/s a las 07:00 horas. Para el 12 de enero entre las 08:00 y las 10:00 se presentaron velocidades cercanas a 1 m/s desde el E y NE, mientras que para estas mismas horas durante el 13 de enero las velocidades fueron de mayor magnitud (cercanas a 2 m/s) y provenientes del NE y NW. Entre las 11:00 y las 15:00 el 12 de enero se presentaron velocidades de magnitudes similares pero con gran variabilidad en la dirección (entre el NE y el S), mientras que en esas mismas horas para el 13 de junio se presentaron direcciones desde direcciones NW, NE, SW y SE. Entre las 16:00 y 19:00 se presentaron direcciones contrarias para los dos días, con vientos del NE para el 12 de enero y vientos del SW para el 13 de enero, con velocidades mayores a 2.5 m/s entre las 16:00 y 17:00 y menores velocidades entre las 18:00 y 19:00 para los dos días.

El 4 y 5 de marzo presentaron un comportamiento diferente en las condiciones del viento. El 4 de marzo se presentaron velocidades inferiores a 2 m/s durante todo el día, mientras que las magnitudes de la velocidad para el 5 de marzo presentaron

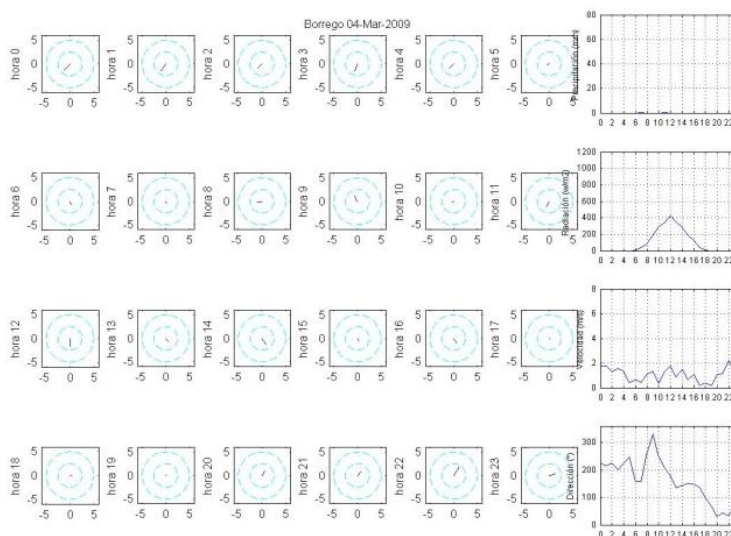
una tendencia creciente durante todo el día alcanzando velocidades de hasta 5 m/s. La dirección del viento también presentó diferencias notables para estos dos días.



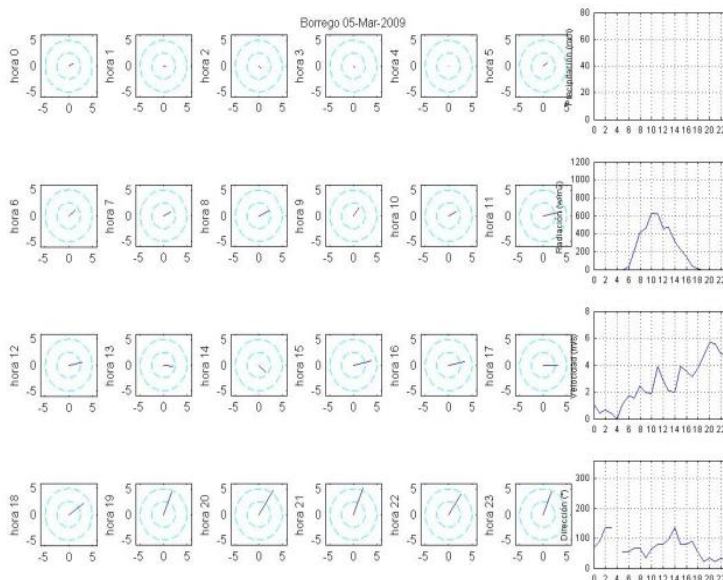
Comportamiento de la velocidad del viento para cada hora del día en coordenadas polares
 a) Meteorología 12 de enero 2009



b) Meteorología 13 de enero 2009



c) Meteorología 04 de marzo 2009



d) Meteorología 05 de marzo 2009

Figura 30 Comportamiento de los vientos durante el día Estación Borrego
Fuente: El Autor

De lo observado en los gráficos anteriores se confirma que los análisis estadísticos realizados no representan adecuadamente el comportamiento del viento para la zona, que pese a registrarse algunos patrones estos son difíciles de predecir y complejos de describir.

Como comportamiento general para la zona se podía decir que durante todos los periodos predominan vientos provenientes del NE y SW (Figura 27) con variaciones importantes durante las diferentes horas del día (Figura 28, Figura 29).

En general un día típico en la zona se caracteriza por vientos del NE durante las horas de la madrugada y tarde en la noche (predominancia del efecto sinóptico). Para el primer periodo se registran mayores velocidades de viento posiblemente por la intensificación del efecto sinóptico relacionado con la posición extrema de la ZCIT y el efecto térmico (vientos catabáticos del Perijá) tiene la misma dirección del efecto sinóptico. Con la salida del sol, vientos anabáticos empieza a manifestarse debido al efecto térmico, la dirección del viento durante las horas diurnas dependerá de la intensidad de cada uno de los factores intervinientes (sinóptico y térmico). Al final de la tarde las fuerzas generadas por los gradientes térmicos disminuyen, se registran unas horas de transición y finalmente el efecto sinóptico retoma el dominio. Durante las horas nocturnas en los periodos 2, 3 y 4 se registra un alto porcentaje de calmas las cuales dependerán de las condiciones sinópticas en especial de la posición de la ZCIT.

El comportamiento sinóptico de la zona está determinado por la posición de la zona de confluencia intertropical y los eventos sinópticos que tengan influencia en la zona norte de Colombia.

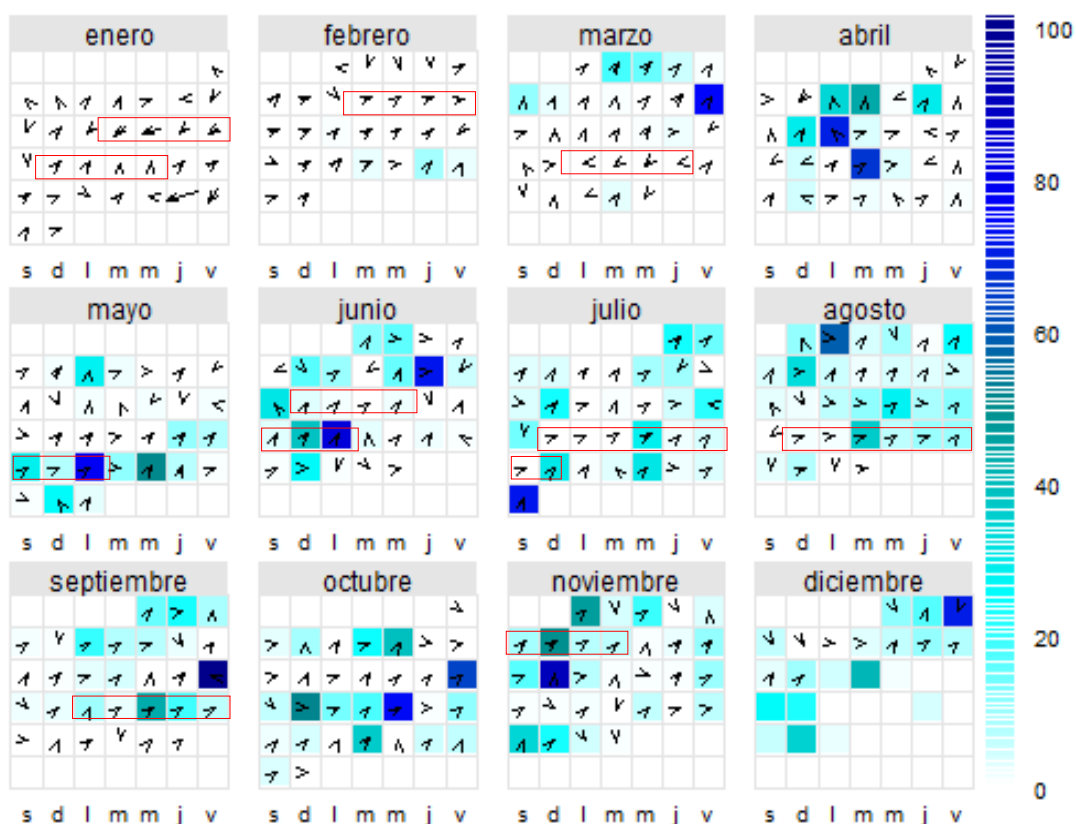
De los anterior se puede concluir además de la gran variabilidad de los datos, que el análisis estadístico de estos datos es válido para las variables escalares tales como la temperatura, radiación, precipitación, entre otras; sin embargo para la variable vectorial (velocidad y dirección del viento) los comportamientos sugeridos no corresponden a los patrones de comportamiento diario, situación que hace susceptible de evaluar los escenarios de pronóstico a partir de modelos computacionales.

4.2.3 Comportamiento diario de las principales variables meteorológicas.

Con el propósito de realizar un análisis de las principales variables meteorológicas se generaron calendarios meteorológicos los cuales permiten observar el comportamiento de la meteorología a lo largo de los meses e identificar eventos tales como días con direcciones similares, cambios de dirección, variación de velocidad, eventos meteorológicos, entre otros.

En la Figura 31 se presenta el calendario meteorológico para la estación Borrego correspondiente al año 2010. La precipitación es representada mediante el fondo de la celda en una escala de color azul en donde la intensidad del color corresponde a la cantidad de precipitación registrada por la estación. La fecha dibujada en cada celda corresponde a la dirección del viento para el día (promedio vectorial) y el tamaño de la flecha indica la magnitud de la velocidad. El conjunto completo de calendarios se presenta en el Anexo B.

Para la zona no se registran patrones periódicos apreciables, sin embargo durante los meses de enero y febrero pueden presentarse días con vientos predominantes del NE con altas velocidades. Adicionalmente se registra un evento particular para diciembre de 2011 en el que finalizadas las lluvias se presenta predominancia marcada de vientos del NE a partir de mediados del mes los cuales se acompañan de altas magnitudes.



En la gráfica se observa una gran variabilidad de las direcciones entre los días, sin embargo en algunos meses se registran conjuntos de días con similar dirección dominante (los recuadros rojos se señalan algunos de estos) lo que puede corresponder a eventos sinópticos. Cuando se registran lluvias generalmente se presentan con vientos provenientes del SW. Es importante resaltar que en el 2010 el país estuvo afectado por un fuerte fenómeno sinóptico.

Figura 31 Calendario meteorológico para la estación Borrego año 2010
 Fuente: El Autor

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y TSP EN LA ZCC Y ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES ENTRE ESTOS.

4.3.1 Comportamiento mensual de las concentraciones de TSP y PM₁₀

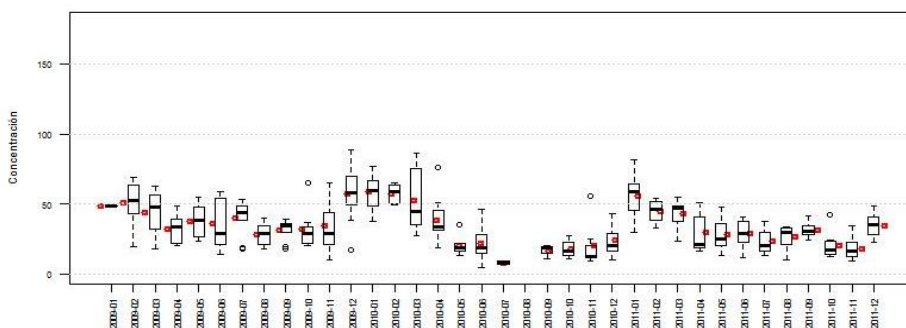


Figura 32 Comportamiento mensual de las concentraciones de PM₁₀ (µg/m³) estación ZM1 La Loma Centro 2009-2011
Fuente: El Autor

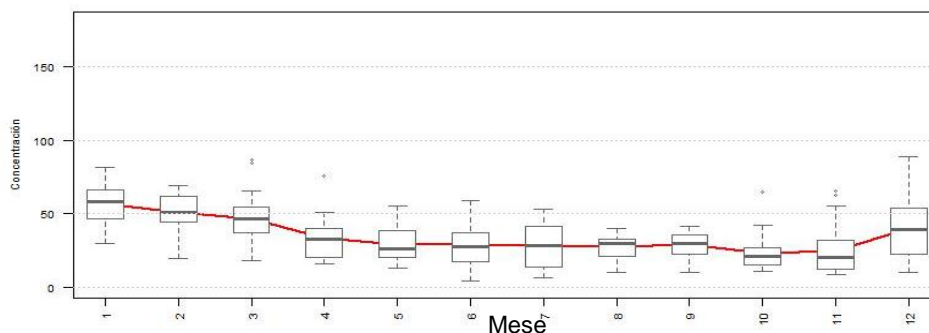


Figura 33 Comportamiento promedio mensual de las concentraciones de PM₁₀ (µg/m³) estación ZM1 La Loma Centro
Fuente: El Autor

Del análisis de las Figura 32, Figura 33 y el conjunto completo presentado en el Anexo C2 se puede decir que en general para la zona se observa un marcado ciclo estacional dependiente de las precipitaciones, con las mayores concentraciones durante los meses de enero y febrero (periodo 1) y las menores entre octubre y noviembre, durante los meses de marzo, abril y diciembre se presentan la transición entre las altas y bajas concentraciones. El comportamiento de los parámetros de calidad de aire TSP y PM₁₀ presenta tendencias similares, altas correlaciones durante las épocas húmedas entre los parámetros medidos en las

estaciones y entre las estaciones. Durante la época seca (periodo 1) se registran incrementos en los niveles de PM que pueden estar relacionados con resuspensión eólica y mecánica e incremento del aporte de algunas fuentes.

Por otra parte se generaron promedios trimestrales móviles de las concentraciones de PM₁₀ los que se presentan en la Figura 35 y Figura 36, y para TSP en la Figura 34 y Figura 37. De estas figuras se puede decir que se confirma el marcado patrón estacional registrado por los niveles de PM en la zona, la correspondencia espacial de estas variaciones esencialmente entre todas las estaciones.

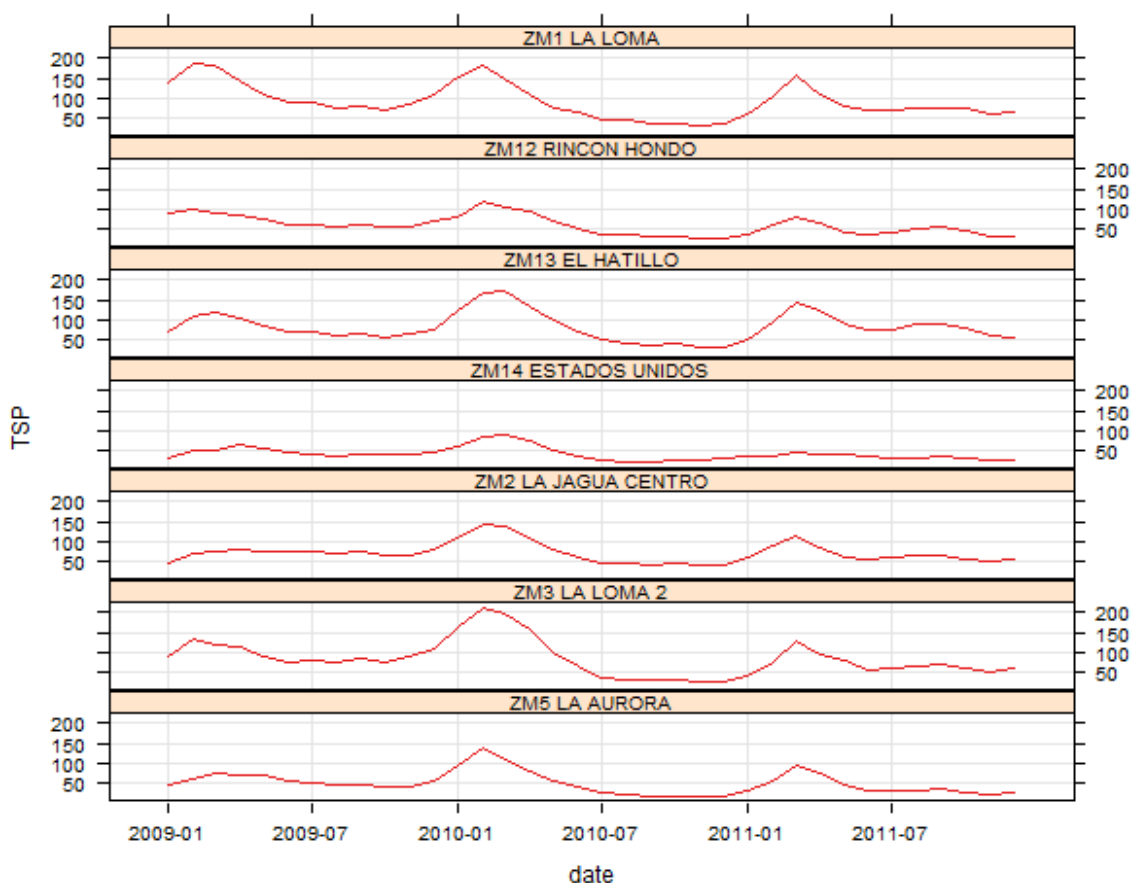


Figura 34 Promedios móviles trimestrales de TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) estaciones de fondo
 Fuente: El Autor

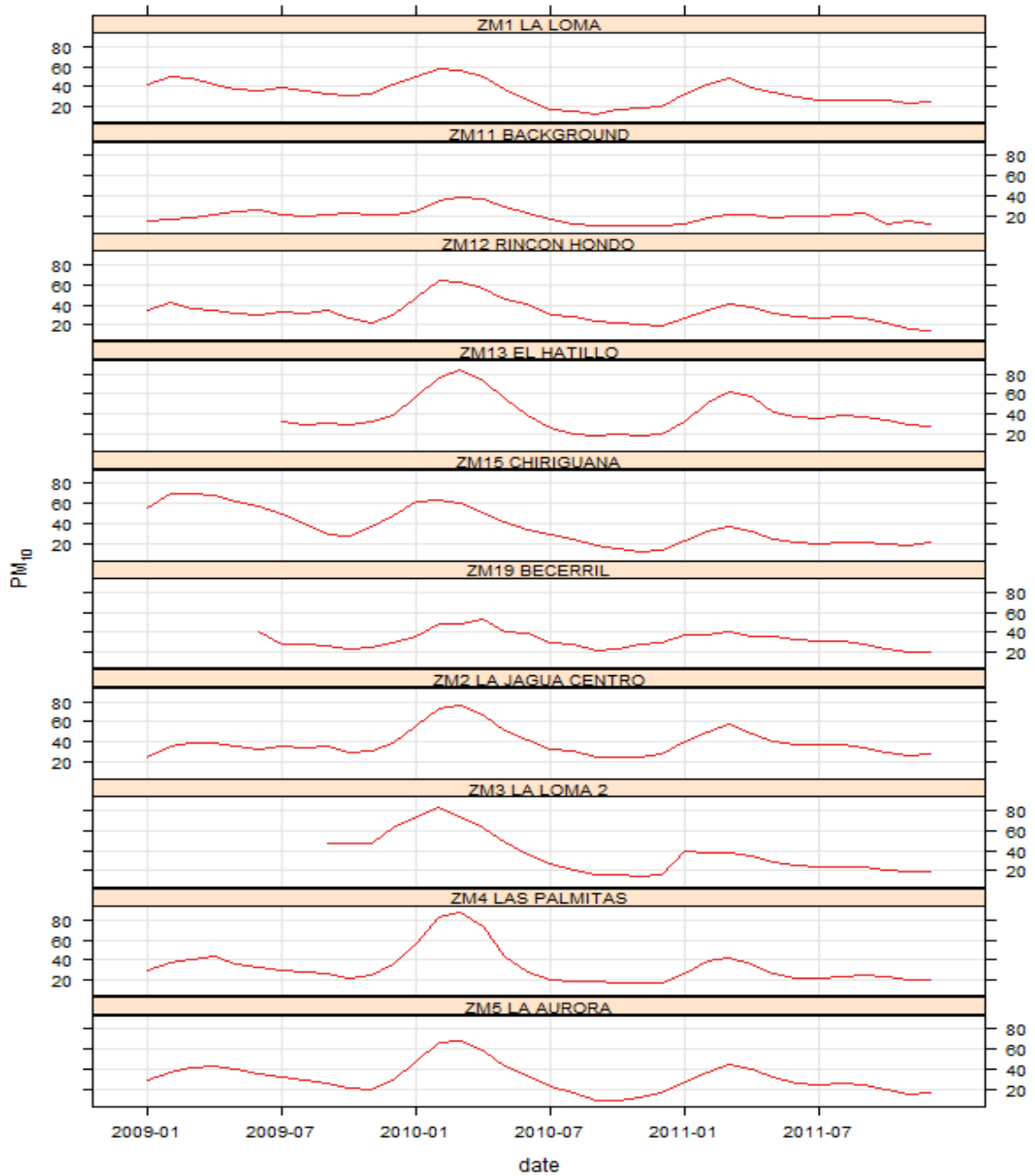


Figura 35 Promedios móviles trimestrales de PM₁₀ (µg/m³) estaciones de fondo
Fuente: El Autor

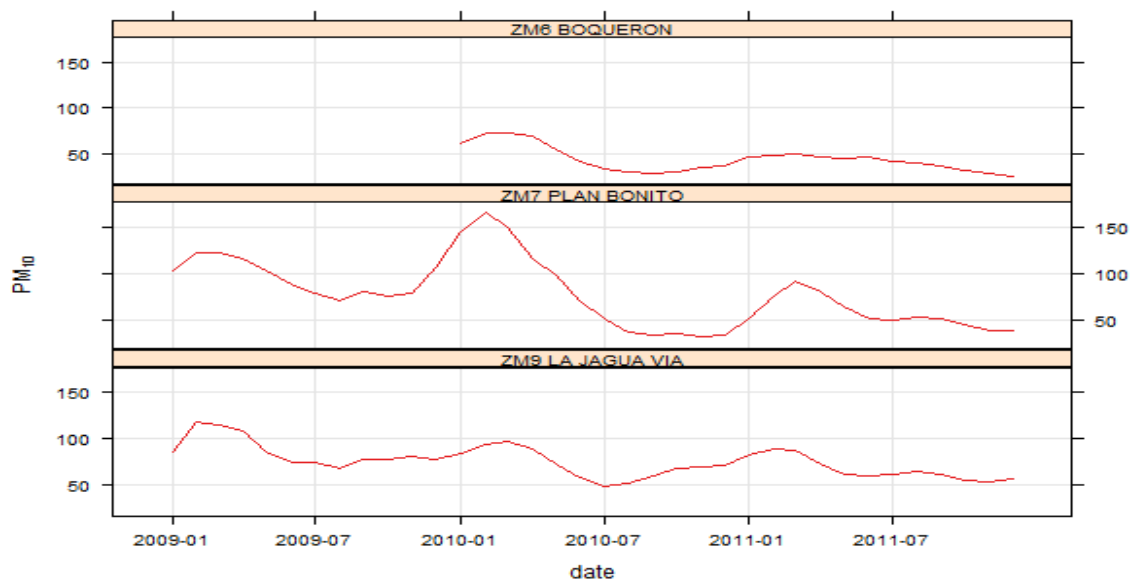


Figura 36 Promedios móviles trimestrales de PM₁₀ (µg/m³) efecto de tráfico
Fuente: El Autor

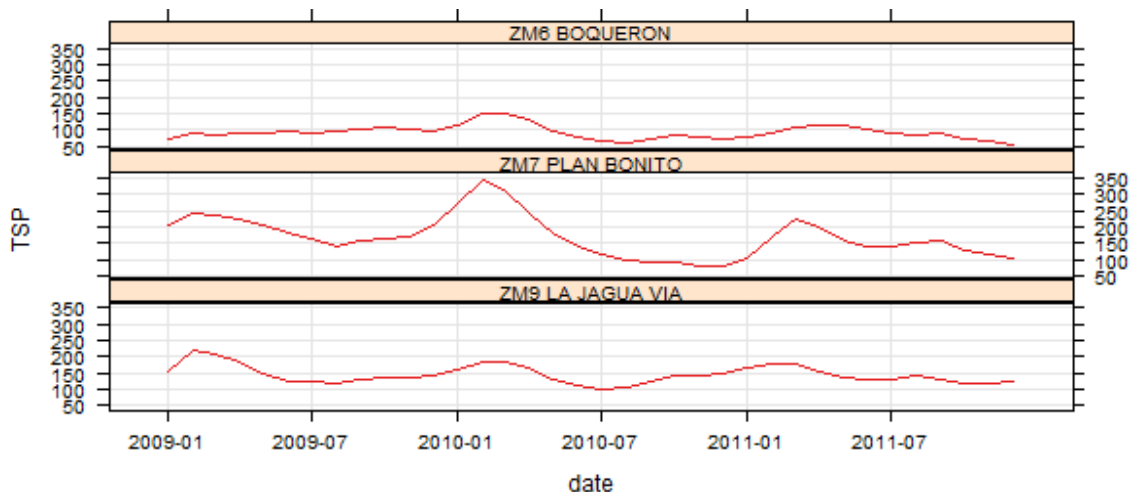


Figura 37 Promedios móviles trimestrales de TSP (µg/m³) efecto de tráfico
Fuente: El Autor

4.3.2 Relación entre PM₁₀ y TSP

Con el propósito de conocer la relación existente entre PM₁₀ y TSP, se graficaron las concentraciones de PM₁₀ vs TSP, para las estaciones que miden simultáneamente estos parámetros y se ajustó un modelo de regresión lineal para cada estación y periodo meteorológico, encontrándose buenas correlaciones e incremento de estas con el aumento de la precipitación.

Altas correlaciones entre estos parámetros indican un bajo nivel de alteración de las muestras, predominancia de contaminantes primarios y que las fuentes principales no varían de forma apreciable en el tiempo.

Las estaciones ZM12 y ZM5 son las que registran menores coeficientes de correlación en general para todos los periodos, esto puede estar relacionado con la mayor distancia entre las estaciones y las fuentes.

Las disminuciones en la correlación durante el periodo 1, pueden estar asociadas a resuspensión mecánica la cual se intensifica en esta época del año, sin embargo para las estaciones ZM3 y ZM7 durante este periodo registran coeficientes de correlación altos lo que puede estar relacionado con la cercanía de estas dos estaciones a sus posibles fuentes principales de acuerdo a la predominancia de vientos. Por otra parte el incremento en la correlación durante la época húmeda puede estar asociado a disminución en la variabilidad de los datos y deposición húmeda.

En la Tabla 9 se presentan los coeficientes de correlación y los parámetros del modelo para relación $PM_{10} - TSP$.

Tabla 9 Coeficiente de correlación para la relación $PM_{10} - TSP$ ($PM_{10}=a[TSP] + b$)

Estacion	Periodo 1			Periodo 2			Periodo 3			Periodo 4		
	a	b	r^2	a	b	r^2	a	b	r^2	a	b	r^2
ZM1	0.16	24	0.38	0.22	13	0.78	0.38	3.4	0.8	0.23	8.5	0.83
ZM2	0.69	12	0.63	0.64	8.2	0.61	0.48	4.3	0.81	0.6	13	0.59
ZM3	0.33	-2.6	0.92	0.37	8.6	0.83	0.29	7.8	0.74	0.19	8.5	0.85
ZM5	0.27	21	0.45	0.31	8.5	0.78	0.6	0.97	0.83	0.28	11	0.54
ZM6	0.46	0.81	0.67				0.49	-0.97	0.52	0.34	6.7	0.88
ZM7	0.46	-5.9	0.87	0.42	2.7	0.86	0.39	-2.1	0.88	0.31	3.2	0.91
ZM9	0.5	-1.2	0.79	0.45	15	0.69	0.47	-0.85	0.92	0.43	1	0.96
ZM12	0.23	20	0.5	0.39	3.6	0.73	0.54	3.3	0.86	0.35	7.2	0.55
ZM13	0.41	2.9	0.72	0.34	8.1	0.83	0.47	0.37	0.93	0.35	5.5	0.91

Los $r^2 > 0.8$ se resaltan con celdas de color verde.

Los $0.5 < r^2 < 0.8$ se resaltan con celdas de color amarillo.

Fuente: El Autor

En la Figura 38 se presentan los elementos que conforman las gráficas PM_{10} – TSP. Los gráficos de dispersión del conjunto de variables para todas las estaciones se presentan en la Figura 41, su ecuación de ajuste y franja de variación de la estimación con un intervalo de confianza del 95%, además de tres líneas que parten del origen con pendientes 0.5, 1 y 2.

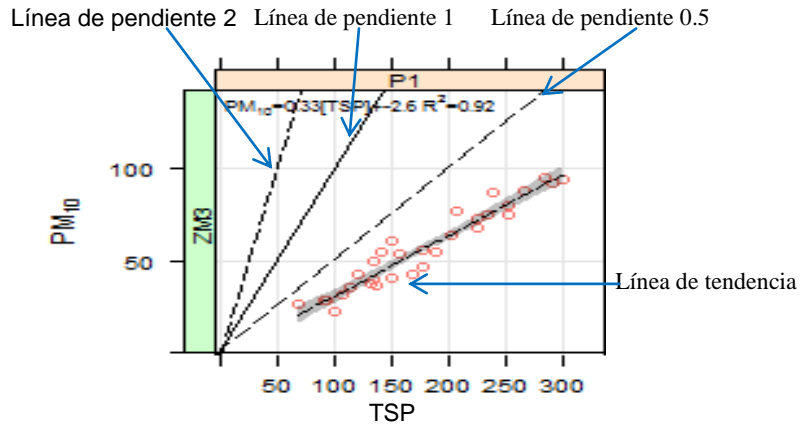


Figura 38 Elementos de las gráficas PM_{10} – TSP
 Fuente: El Autor

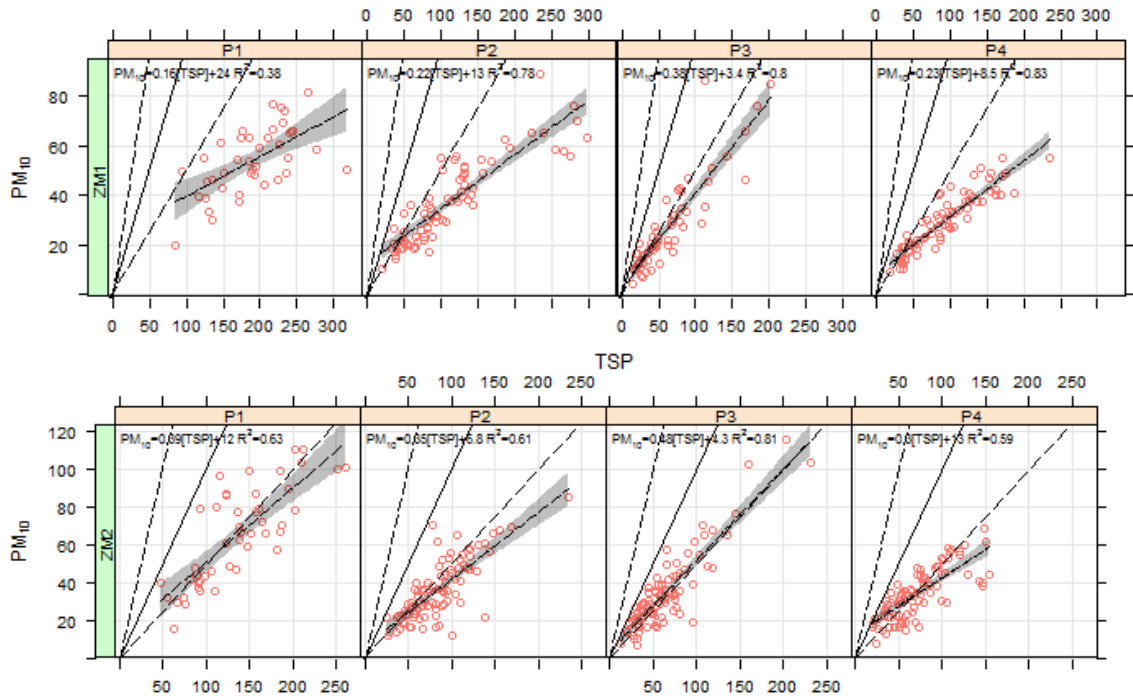


Figura 39 Relación PM_{10} - TSP para cada periodo estación ZM1, ZM2
 Fuente: El Autor

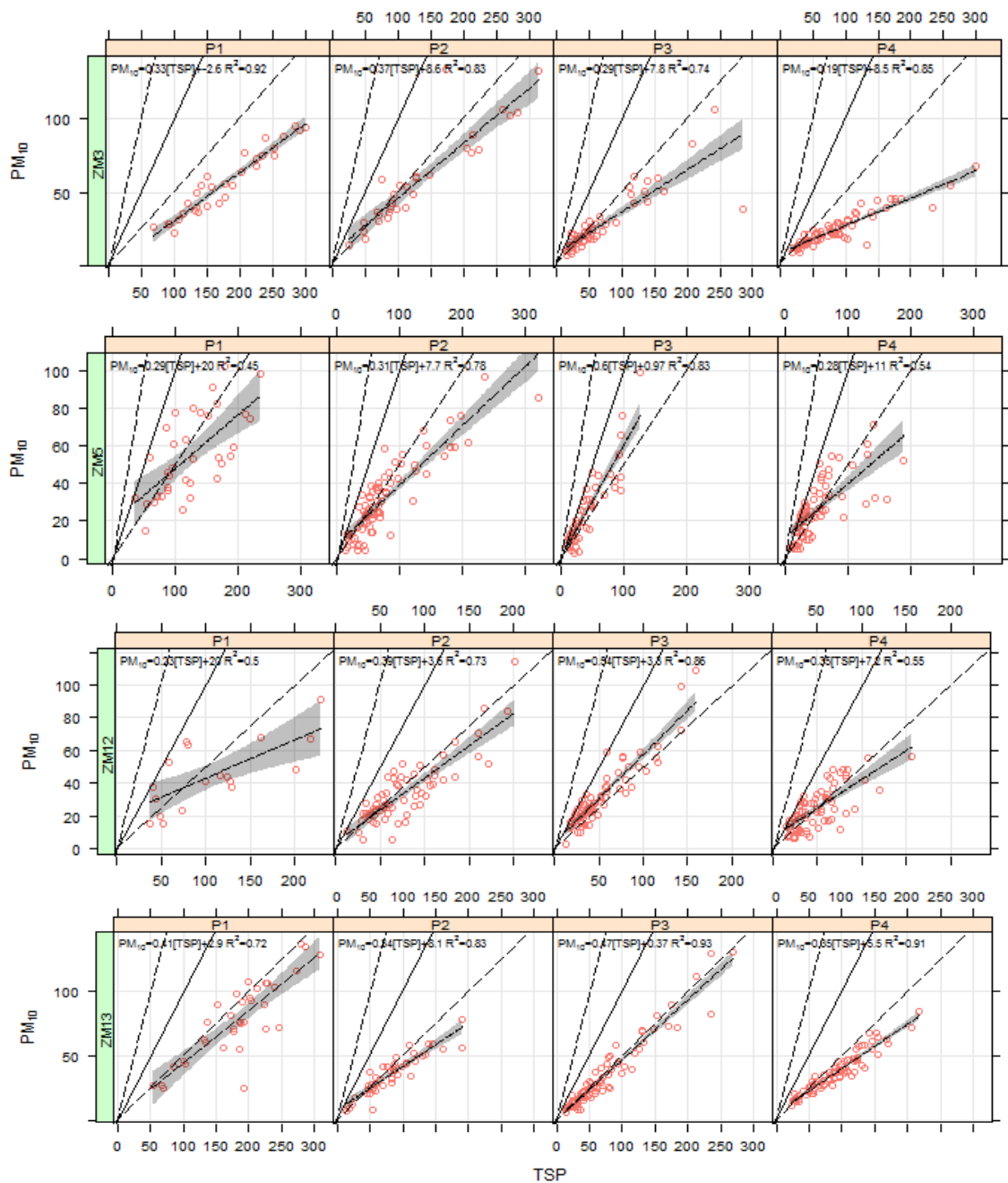


Figura 40 Relación PM₁₀ - TSP para cada periodo por estación de calidad de aire (ZM3, ZM5, ZM12 y ZM13)

Fuente: El Autor

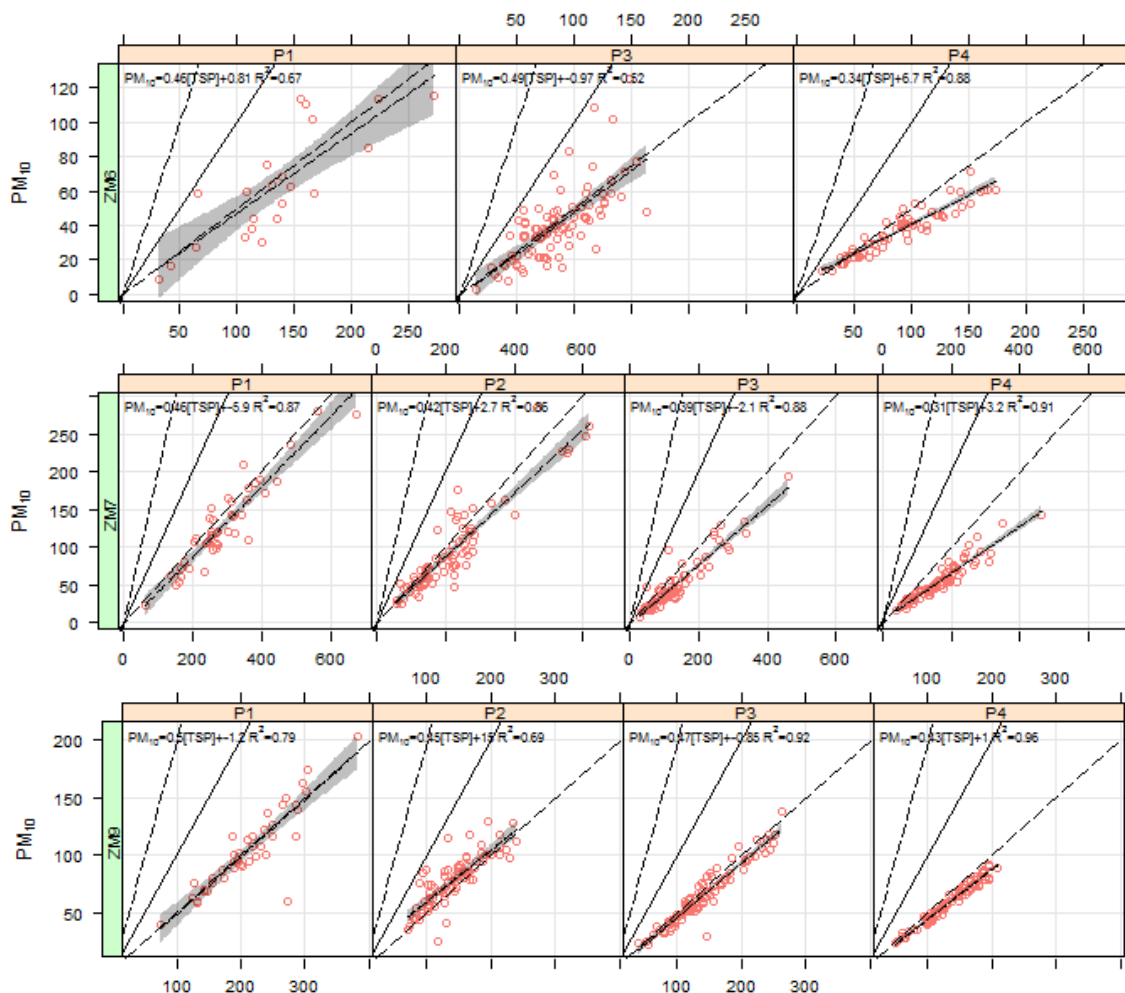


Figura 41 Relación PM₁₀ - TSP para cada periodo por estación de calidad de aire (ZM6, ZM7 y ZM9)
Fuente: El Autor

4.4 ASOCIACIÓN DE SITIOS DE MEDICIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS A ESTACIONES DE CALIDAD DE AIRE

Como se presentó en la Figura 1 las estaciones meteorológicas se encuentran localizadas al interior de los proyectos mineros y no en las estaciones de calidad de aire; debido a que esta información es de gran relevancia para comprender las variaciones de los niveles de PM, se hace necesario asociar a cada estación de calidad de aire el comportamiento reportado por la estación meteorológica que registre mejor relación entre sus mediciones y las variaciones en los niveles de PM.

Para la asociación de sitios de medición de variables meteorológicas a estaciones de calidad de aire se contemplaron tres elementos, la distancia entre las estaciones de aire y meteorológicas, relación entre precipitación y los niveles de PM y relación entre velocidad y dirección del viento con las concentraciones de PM.

Con el propósito de contar con todos los elementos necesarios para el desarrollo de esta etapa se realizó la actualización cartográfica de la zona a través de una imagen aérea, además de la localización de los hitos de interés (estaciones de calidad de aire, meteorológicas, vías, entre otros).

En la Figura 42 se presenta la cartografía de la ZCC actualizada a 2011, en este mapa se incluyó la localización de las principales fuentes de emisión, los receptores ambientales y las estaciones de medición de parámetros meteorológicos.

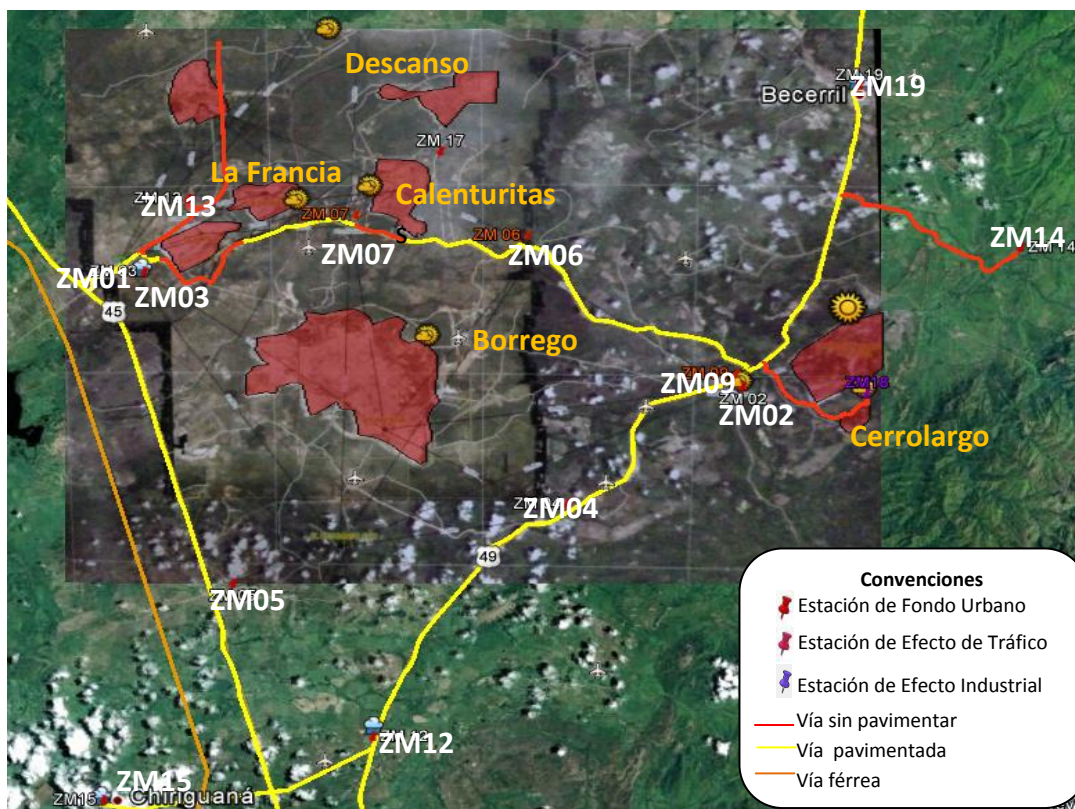


Figura 42 Cartografía de la ZCC actualizada a 2011, SEVCA_ZCC
Fuente: SEVCA_ZCC

4.4.1 Distribución espacial de las estaciones de calidad del aire respecto a las estaciones meteorológicas y las principales fuentes de PM.

Con el propósito de establecer la distribución espacial de las estaciones meteorológicas respecto a las estaciones de calidad de aire se determinaron las distancias entre estas. En la Figura 43 y la Tabla 10 se presentan las distancias entre estas estaciones.

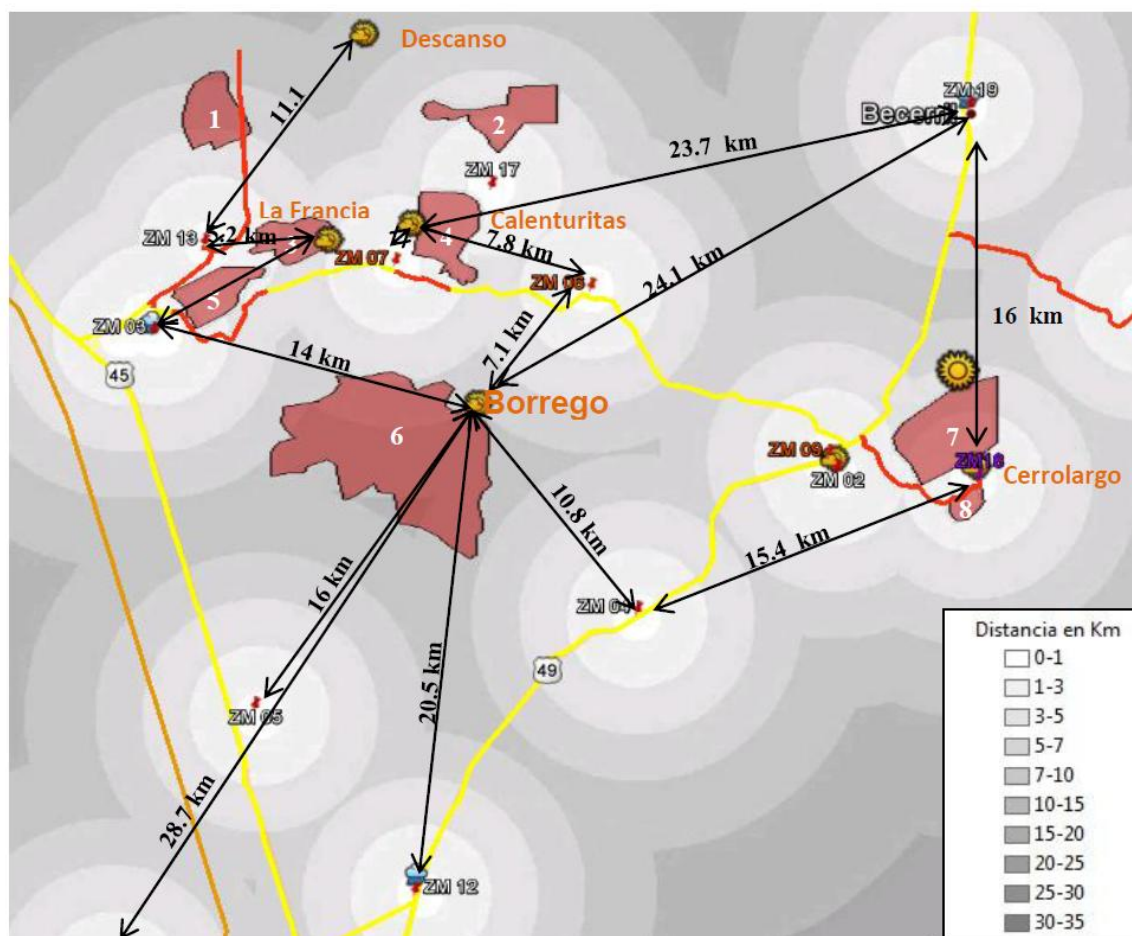


Figura 43 Mapa de las distancias entre estaciones de calidad de aire y estaciones meteorológicas
Fuente: El Autor

Tabla 10 Distancias entre estaciones de calidad de aire y estaciones meteorológicas (en km)

Cod Estación Aire	Borrego	Cerrolargo	Descanso	Calenturitas	La Francia IDEAM
ZM1	15.5				9.7
ZM2		5.8			
ZM3	14				8.2

Cod Estación Aire	Borrego	Cerrolargo	Descanso	Calenturitas	La Francia IDEAM
ZM4	10.8	15.4			
ZM5	16				
ZM6	7.1			7.8	
ZM7				1.5	2.8
ZM9		6.2			
ZM11			23		
ZM12	20.5				
ZM13			11.1		5.2
ZM14		10.5			
ZM15	28.7				
ZM19		16	25.25	23.7	

Fuente: El Autor

Adicionalmente se determinaron las distancias entre las estaciones de calidad de aire y las principales fuentes presentes en la zona. En la Figura 44 y la Tabla 11 se presentan estas distancias.

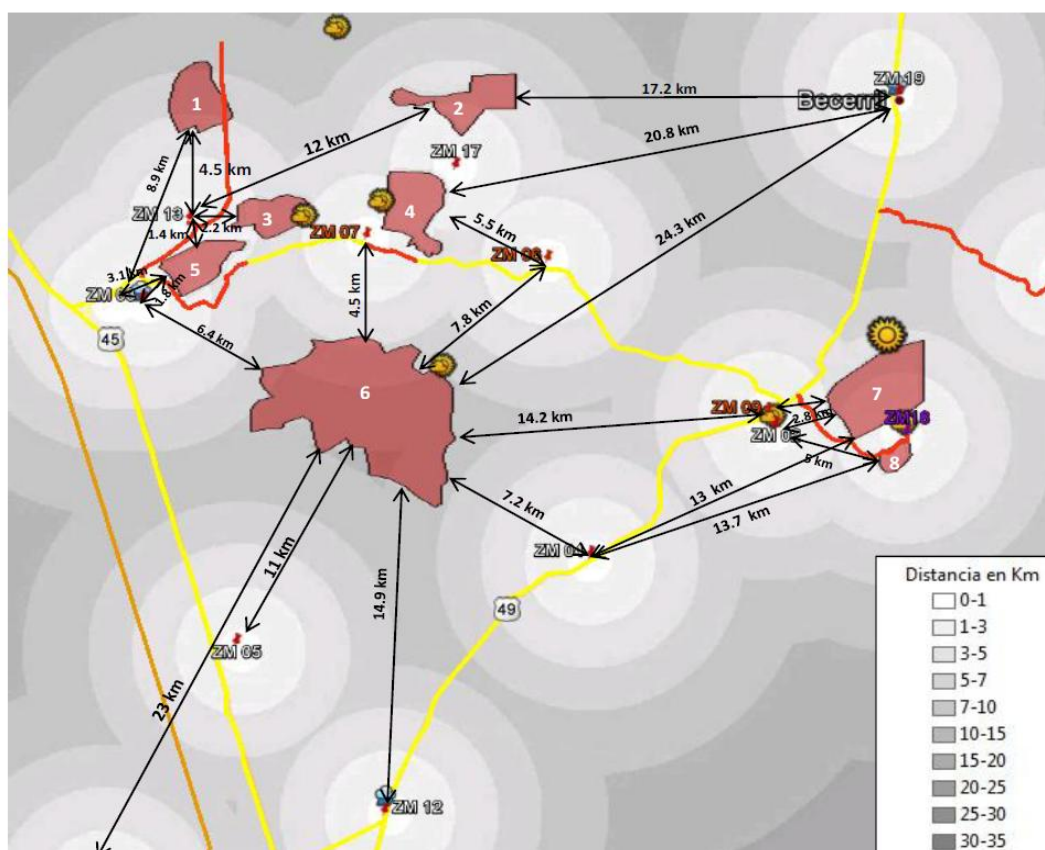


Figura 44 Distancias entre estaciones de calidad de aire y fuentes
 Fuente: El Autor

Tabla 11 Distancias entre estaciones de calidad de aire y fuentes de PM (en km)

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	vía
ZM1	8.9				3.1	7.8			
ZM2						14.2	2.8	5	
ZM3	8.6				1.8	6.4			
ZM4						7.2	13	13.7	
ZM5						11			
ZM6		7.8		5.5		7.8			200
ZM7			3	1		4.5			152
ZM9						14	2.8	5.4	30
ZM12						14.9			
ZM13	4.5	12	2.2		1.4				
ZM14							6.8	10.8	
ZM15						23			
ZM19		17.2		20.8		24.3	12		

Los números en los encabezados corresponden a las principales fuentes de emisión

Fuente: El Autor

4.4.2 Relación entre precipitación y concentración de PM en una combinación de estaciones de calidad de aire con estaciones meteorológica.

Debido a la reconocida relación existente entre precipitación y concentración de PM en el aire se graficaron estas dos variables con el propósito de evaluar la fortaleza y tendencia de ésta.

En la Figura 45 se presentan dos conjuntos de gráficas, las de la izquierda corresponden a TSP y las de la derecha a PM₁₀. Todas las gráficas en la ordenada presentan la concentración promedio mensual (aritmético para PM₁₀ y geométrico para TSP) y en la abscisa la precipitación acumulada mensual. Por propósitos de visualización, la abscisa inicia con valores menores que cero. El conjunto completo de gráficas se presentan en el Anexo D apartado D1.

En general para las estaciones de calidad de aire localizadas en la zona, se observa relación significativa con la precipitación reportada por las estaciones meteorológicas, esto con base en los buenos ajustes del modelo de regresión. Según el coeficiente 'C_i' del modelo para meses en los que la precipitación sea cercanas a cero para la variable TSP solo las estaciones ZM2 La Jagua Centro,

ZM14 Estados Unidos, ZM5 La Aurora y ZM12 Rincón Hondo no tendría promedio mensual superior a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para la variable PM_{10} las estaciones que no tendrían promedio mensual superior a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ serían ZM2 La Jagua Centro, ZM5 La Aurora, ZM11 Minguillo, ZM12 Rincón Hondo y ZM19 Becerril.

Tabla 12 Parámetros de ajuste del modelo matemáticos para PM_{10}

Estación Aire	Estación Meteorológica	r^2	$C = aR_{acm} + C_i$	
			a $\mu\text{g}/(\text{mm}.\text{m}^3)$	C_i $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZM1	Borrego	0.98	-0.09	51.64
ZM1	La Francia IDEAM	0.73	-0.09	47.77
ZM2	Cerrolargo	0.52	-0.05	46.22
ZM3	Borrego	0.85	-0.10	56.38
ZM3	La Francia IDEAM	0.59	-0.11	52.91
ZM4	Cerrolargo	0.51	-0.06	41.92
ZM4	Borrego	0.78	-0.10	53.42
ZM5	Borrego	0.94	-0.10	49.89
ZM6	Borrego	0.57	-0.06	55.27
ZM6	Calenturitas	0.56	-0.07	51.41
ZM7	Calenturitas	0.67	-0.21	98.00
ZM7	Borrego	0.94	-0.24	125.07
ZM9	Cerrolargo	0.70	-0.07	86.69
ZM11	Descanso	0.74	-0.03	23.12
ZM12	Borrego	0.92	-0.08	48.67
ZM13	La Francia IDEAM	0.58	-0.13	63.72
ZM13	Descanso	0.85	-0.08	51.12
ZM15	Borrego	0.77	-0.09	55.06
ZM19	Calenturitas	0.44	-0.04	36.05
ZM19	Descanso	0.71	-0.03	37.29
ZM19	Cerrolargo	0.30	-0.02	37.01

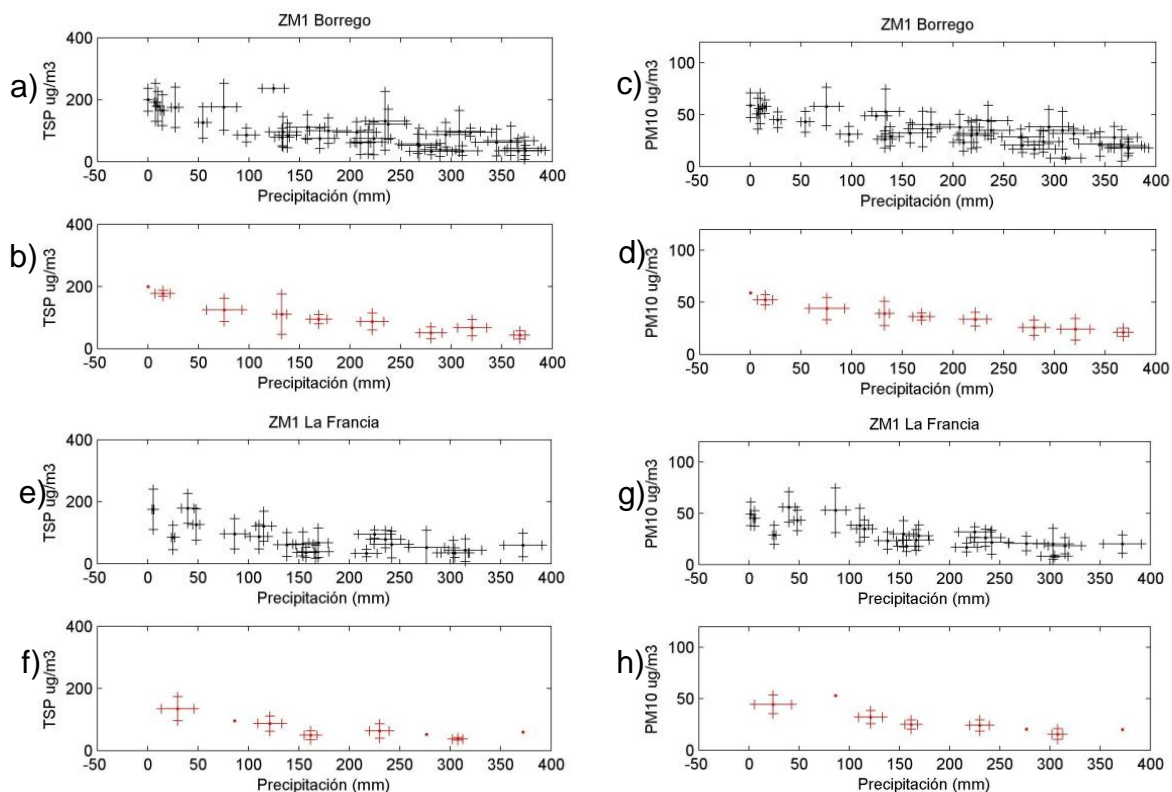
Fuente: El Autor

Tabla 13 Parámetros de ajuste del modelo matemático para TSP

Estación Aire	Estación Meteorológica	r^2	$C = aR_{acm} + C_i$	
			a $\mu\text{g}/(\text{mm}.\text{m}^3)$	C_i $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZM1	Borrego	0.91	-0.34	161.58
ZM1	La Francia IDEAM	0.66	-0.22	115.60
ZM2	Cerrolargo	0.58	-0.10	89.08
ZM3	Borrego	0.91	-0.31	149.10
ZM3	La Francia IDEAM	0.64	-0.30	133.94
ZM5	Borrego	0.91	-0.20	92.09
ZM6	Borrego	0.90	-0.15	121.59
ZM6	Calenturitas	0.49	-0.13	105.49
ZM7	Calenturitas	0.67	-0.40	213.10
ZM7	Borrego	0.97	-0.47	263.86
ZM9	Cerrolargo	0.55	-0.11	162.37
ZM12	Borrego	0.98	-0.19	97.33

Estación Aire	Estación Meteorológica	r^2	$C = aR_{acm} + C_i$	
			a $\mu\text{g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^3)$	C_i $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZM13	La Francia IDEAM	0.68	-0.25	126.88
ZM13	Descanso	0.86	-0.17	105.20
ZM14	Cerrolargo	Muy pocos datos		

Fuente: El Autor



En la gráfica (a) los puntos representan las concentraciones promedio para los meses de la serie de tiempo de la estación ZM1 La Loma Centro y la precipitación acumulada mensual de la estación meteorológica Borrego y los bigotes representan la desviación estándar de cada conjunto de datos. En al gráfica (b) se presentan los promedios sectorizados respecto a la precipitación (con intervalos monótonos de 10 mm). Adicionalmente a la gráfica (b) se le ajustó un modelo de regresión lineal con el objeto de contar para cada estación con una ecuación que permita estimar las concentraciones promedio de cada mes respecto a la precipitación acumulada proyectada por estación, los parámetros de los modelos se presentan en la Tabla 13 y Tabla 12. En las gráficas de la (e) – (h) se presenta el mismo análisis con la precipitación de la estación La Francia IDEAM.

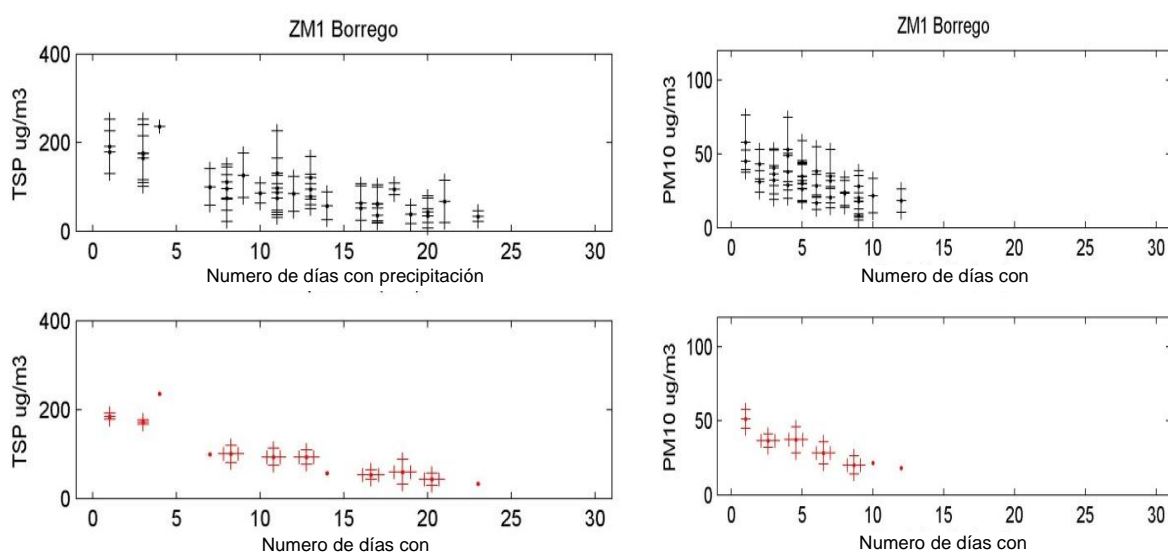
Figura 45 Concentración promedio mensual vs. precipitación acumulada mensual y promedios sectorizados.

Fuente: El Autor

Adicionalmente fue evaluada la tendencia sustituyendo la precipitación por el número de días con lluvia. Se definieron dos alternativas para la clasificación de

día de lluvia, en los que se registraran más de 1mm diario y en los que se registraran más de 10mm diarios de precipitación.

De este análisis se encontró que la cantidad de precipitación mensual registra mejor correlación con los niveles de PM, sin embargo la correlación del número de días de lluvia con los niveles de PM es buena. En la Figura 46 se presentan las gráficas para la estación ZM1 La Loma Centro y la estación meteorológica Borrego.



a) Con precipitación mayor a 1mm, el coeficiente de correlación es 0.78

b) Con precipitación mayor a 10mm, el coeficiente de correlación es 0.89

Figura 46 Concentración promedio mensual y numero de días con precipitación en el mes y promedios sectorizados
Fuente: El Autor

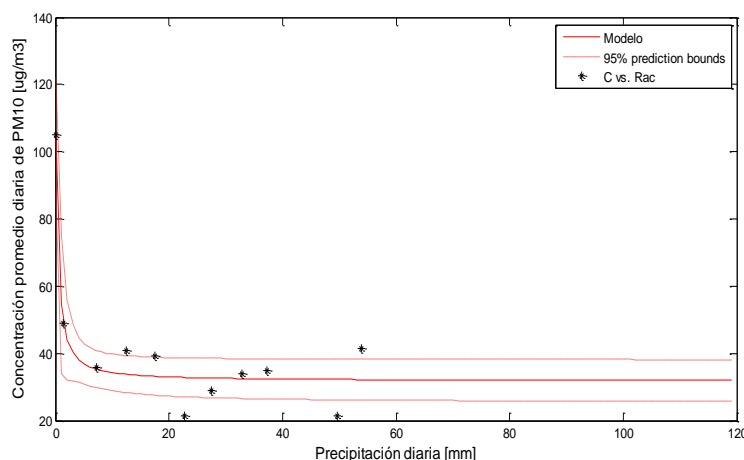
Por otra parte se desarrolló un modelo matemático de acuerdo a lo señalado en el apartado 3.4.2 en el que describiese el fenómeno de deposición húmeda lo que podría determinar el impacto de la precipitación en los niveles de PM. Este modelo se desarrolló con datos diarios de concentración y precipitación. La ecuación (5) corresponde al modelo matemático de deposición húmeda. El desarrollo riguroso del modelo se presenta en el Anexo D apartado D2.

$$\bar{C} = \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} * (1 - e^{-\alpha R_{ac}}) + C_o \quad (5)$$

- \bar{C} = Concentración promedio de PM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- α = Coeficiente de relajación de la curva [1/mm]
- C_i = Coeficiente de ajuste [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- C_o = Concentración base [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- R_{ac} = Precipitación acumulada diaria [mm]

En la Figura 47 se presenta el ajuste del modelo de deposición húmeda para los datos de PM_{10} de la estación ZM7 Plan Bonito. Para este se registra un coeficiente de correlación de 0.91 lo que indica un buen ajuste. El conjunto completo de gráficas se presentan en el Anexo D en los apartados D3 y D4.

El modelo fue ajustado a la combinación de estaciones (meteorológica y calidad de aire) con mejor desempeño según los resultados de los ajustes realizados a los datos de concentración promedio mensual y precipitación acumulada mensual. Los parámetros del modelo para las diferentes combinaciones se presentan en la Tabla 14 para PM_{10} y Tabla 15 para TSP. Con el propósito de evitar la singularidad del modelo cuando la precipitación sea cero se adicionó a los datos una décima de milímetro de precipitación.



Modelo:
 $C(Rac) = C_i/\alpha * (1 - \exp(-\alpha * Rac)) / Rac + C_o$

Coefficientes (con un 95% de confianza):
 $C_i = 86.43 (57.55, 115.3)$
 $C_o = 31.72 (25.39, 38.06)$
 $\alpha = 3.341 (-1.09, 7.771)$

Bondad del ajuste:
 SSE: 445.4
 R-square: 0.9147
 Adjusted R-square: 0.8934
 RMSE: 7.461

Figura 47 Modelo de deposición húmeda estación ZM7 para la variable PM_{10}
 Fuente: El Autor

Tabla 14 Parámetros del modelo de deposición húmeda (PM₁₀)

Estación de calidad de aire	Estación Meteorológica	C _i (µg/m ³)	C _o (µg/m ³)	1/α (mm)	r ²
ZM1	100	25.09	22.54	0.32	0.57
ZM2	200	28.55	23.71	0.66	0.56
ZM3	100	34.51	20.42	0.24	0.68
ZM4	200	31.83	19.74	0.25	0.79
ZM5	100	28.17	19.71	0.16	0.65
ZM6	100	23.38	29.66	0.96	0.70
ZM7	500	86.43	31.72	0.30	0.91
ZM9	200	44.70	37.01	5.97	0.68
ZM12	100	18.21	23.09	0.61	0.79
ZM13	300	38.88	20.82	0.29	0.64
ZM15	100	29.05	20.89	0.18	0.65
ZM19	300	11.96	25.82	0.42	0.33

Fuente: El Autor

Tabla 15 Parámetros del modelo de deposición húmeda (TSP)

Estación de calidad de aire	Estación Meteorológica	C _i (µg/m ³)	C _o (µg/m ³)	1/α (mm)	r ²
ZM1	100	122.60	61.82	0.12	0.42
ZM2	200	71.63	42.62	0.67	0.72
ZM3	100	100.40	52.40	0.28	0.66
ZM5	100	74.81	28.43	0.22	0.95
ZM6	100	42.17	75.04	0.68	0.48
ZM7	500	185.40	90.05	0.35	0.89
ZM9	200	84.53	98.35	0.95	0.66
ZM12	100	48.08	42.10	0.23	0.82
ZM14	200	33.55	31.09	0.67	0.56

Fuente: El Autor

En general, el modelo describe bien la relación entre concentración de PM y precipitación para los contaminantes TSP y PM₁₀ en la mayoría de las estaciones. Es de destacar este resultado debido a que el modelo fue aplicado para datos diarios los cuales registran alta variabilidad. Las estaciones que registran el mejor comportamiento son para TSP ZM5 La Aurora, ZM7 Plan Bonito y ZM12 Rincón Hondo y para PM₁₀ ZM7 Plan Bonito, ZM4 Las Palmitas, ZM6 Boquerón y ZM12 Roncón Hondo.

4.4.3 Relación de concentración con velocidad y dirección del viento

Para la construcción de gráficos de relación entre dirección del viento y concentración de PM es necesario establecer con que tipo de promedio se debe

calcular la dirección del viento. Para evaluar el impacto del promedio vectorial, fueron comparadas las concentraciones de TSP y PM_{10} con la dirección y dirección ponderada (calculada considerando únicamente las fuentes más importantes para cada estación).

En la Figura 48 se presenta la forma de medición de los ángulos de incidencia de las fuentes respecto a las estaciones de calidad de aire. En la Tabla 17 se presentan los ángulos de incidencia para todas las estaciones, en color verde se identifican las fuentes que se consideran más importantes para cada una de las estaciones, los números de los encabezados corresponden a las fuentes señaladas en la Figura 48

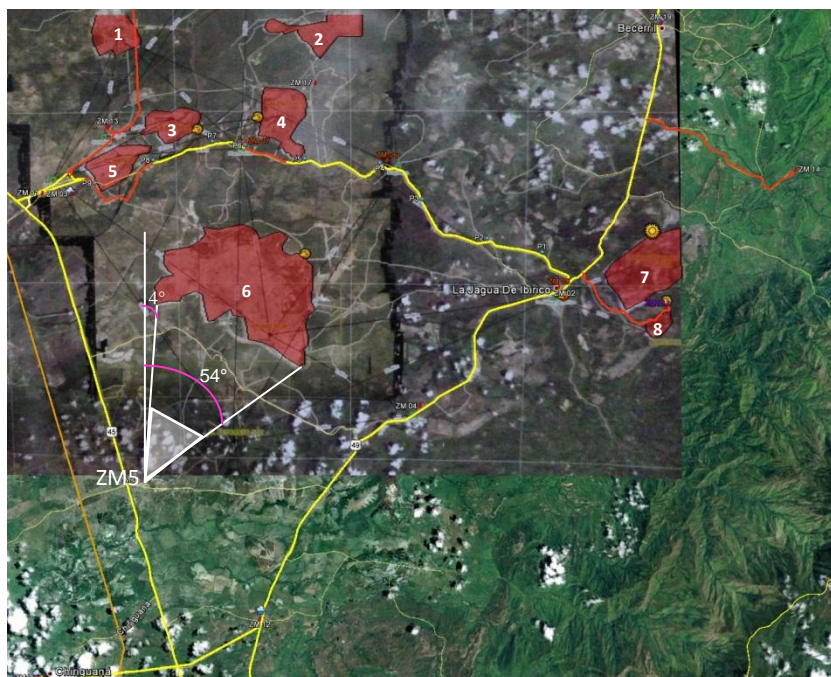
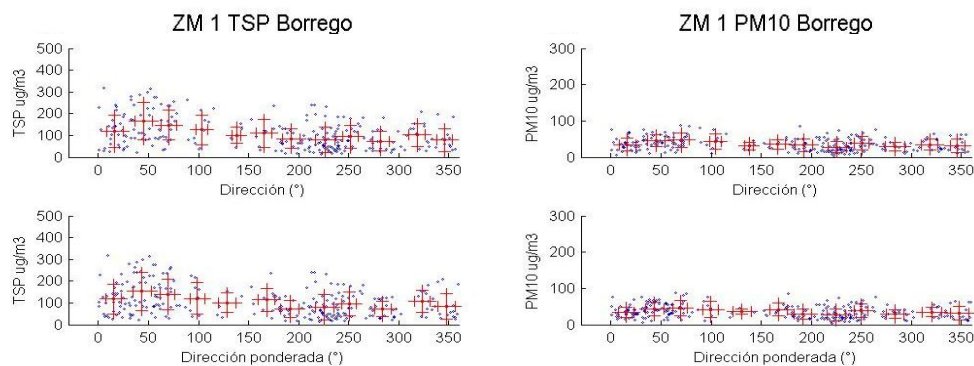


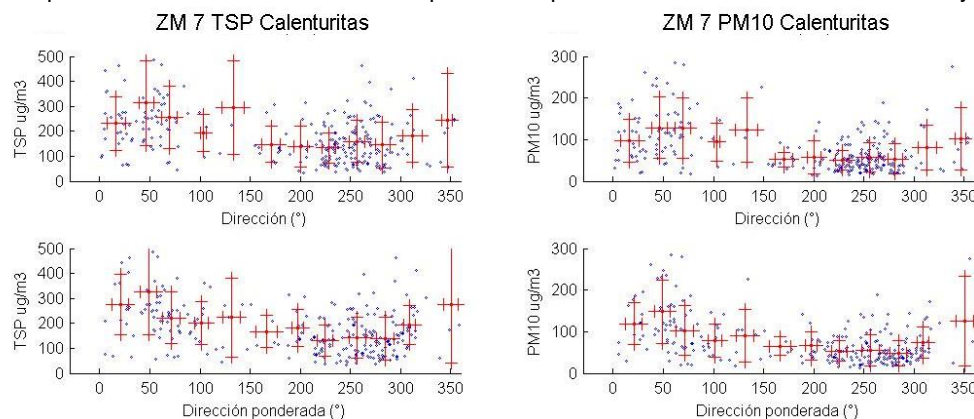
Figura 48 Medición de los ángulos de incidencia de las fuentes respecto a las estaciones de calidad de aire
Fuente: El Autor

En la Figura 49 se presentan las gráficas comparativas entre dirección y dirección ponderada para estaciones localizadas a diferentes distancias de las fuentes. Como resultado esta comparación se encontró que no hay una variación

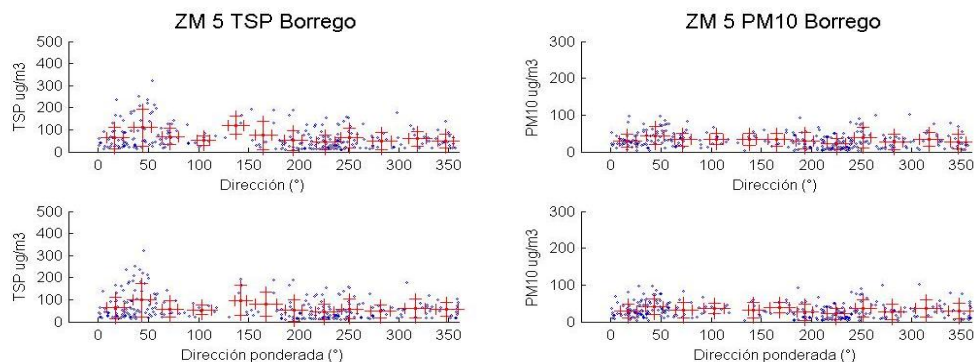
significativa entre estas gráficas, con base en esto se determinó que el promedio vectorial representa adecuadamente las velocidades diarias.



a) Comparación de dirección con dirección ponderada para la estación ZM1 La Loma Centro y Borrego



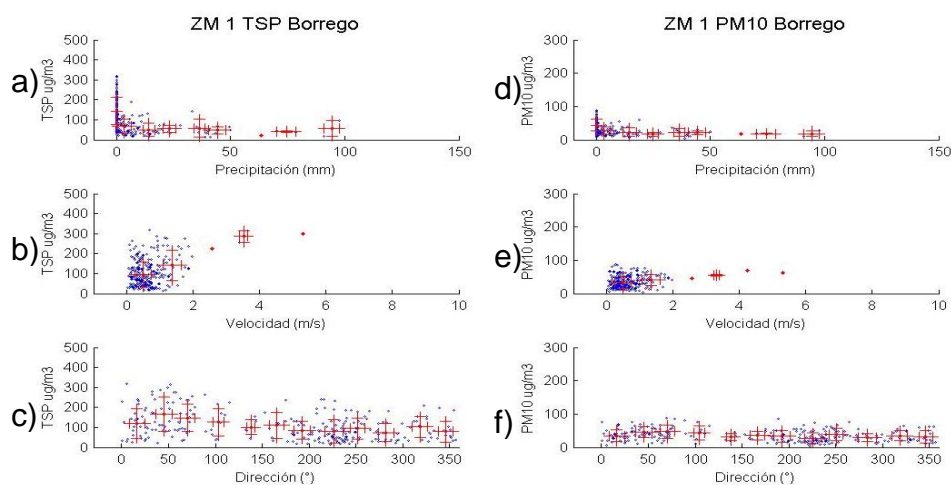
b) Comparación de dirección con dirección ponderada para la estación ZM7 Plan Bonito y Calenturitas



c) Comparación de dirección con dirección ponderada para la estación ZM5 La Aurora y Borrego

Figura 49 Comparación entre promedios vectoriales y promedios vectoriales ponderados
Fuente: El Autor

Una vez seleccionada la forma de cálculo de las direcciones se generaron los gráficos con promedios sectorizados con el propósito de identificar tendencias y relaciones entre las variables meteorológicas y los niveles de PM para cada una de las estaciones de calidad de aire y las posibles estaciones meteorológicas asociadas. En la Figura 50 se presentan estas gráficas para la estación ZM1 La Loma Centro con la estación meteorológica Borrego. El conjunto completo gráficos se presenta en el Anexo F.



En la gráficas (a) y (d) se presenta la relación entre concentración diaria de PM con la precipitación diaria, en esta se aprecia la tendencia modelada por la ecuación (5), sin embargo se registra gran variabilidad para los días con ausencia de precipitación. En la gráfica (b) se presenta la relación entre concentración de TSP diario y velocidad del viento promedio diaria, en esta se aprecia que los niveles de PM se incrementan con el aumento de la velocidad, sin embargo para velocidades inferiores a 1 m/s se registra el mayor número de datos y una amplia dispersión. En al gráfica (c) se presenta la relación entre niveles de TSP diario y la dirección del viento, las mayores concentraciones provienen del intervalo 15°-70° y las menores concentraciones del intervalo de 220°-230°.

Figura 50 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1 con meteorología de Borrego
Fuente: El Autor

Como resultado de la integración de los análisis realizados en los numerales 4.4.1 a 4.4.3 en la Tabla 16 se presenta la asignación de las estaciones meteorológicas a las estaciones de calidad de aire.

Tabla 16 Asignación de estación meteorológica a las estaciones de calidad de aire y distancias entre estas en Km

Estación	Borrego	Cerrolargo	Descanso	Calenturitas	La Francia IDEAM
ZM1	15.5				9.7
ZM2		5.8			
ZM3	14				8.2
ZM4	10.8	15.4			
ZM5	16				
ZM6	7.1			7.8	
ZM7				1.5	2.8
ZM9		6.2			
ZM11			23		
ZM12	20.5				
ZM13			11.1		5.2
ZM14		10.5			
ZM15	28.7				
ZM19		16	25.25	23.7	

Las celdas en color verde corresponden a la estación meteorológica asociadas a la estación de calidad de aire. Las celdas verdes con distancias en color gris representan una asignación para variables diferentes a la velocidad y dirección del viento.

Fuente: El Autor

En la Tabla 17 y en Figura 48 se presenta un consolidado del análisis de los gráficos de relación entre variables meteorológicas y velocidad y dirección del viento con las estaciones meteorológicas asignadas, en esta se incluye el intervalo de dirección en el que se registran las mayores y menores concentraciones, el comportamiento de las concentraciones respecto a la velocidad y la velocidad del viento más probable.

Tabla 17 Intervalos de ángulos de incidencia de las fuentes respecto a las estaciones de calidad de aire y dirección de las mayores concentraciones.

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	MYC	MNC	ICV TSP	ICV PM10	Vel prob
ZM1	16 - 33				56 - 90	101 - 143			15-70	220-230	si	no	0-1.5
ZM2 ¹						255 - 277	58 - 99	99-115					
ZM3	8 - 25				26 - 90	101 - 143			15-70	225-250	si	no	0-1.5
ZM4 ¹						289 - 323	53 - 64	69 - 73					
ZM5						4 - 54			15-70	225	si	no	0-1.5
ZM6		318 - 350		273 - 309		203 - 250			220-240		no	no	0.5 - 1.5
ZM7				19 - 104		151 - 216			40-75	225-315	si	si	0.3-1
ZM9 ¹						253 - 276	71 - 107	107 - 117					
ZM12						289 - 9			50	230	si	no	0-1.5
ZM13	350 - 21	56 - 72	69 - 100		113 - 213				320-170	225	no	no	0-1
ZM14 ¹							227 - 244	219 - 223					
ZM15						17 - 40			--	--		si	0-1.5
ZM19		264 - 272		249 - 260		216 - 228	169 - 193		50 --	225 --		si	

MYC= Origen de las mayores concentraciones.

MNC= Origen de las menores concentraciones.

ICV = se presenta incremento de la concentraciones con el aumento en la velocidad

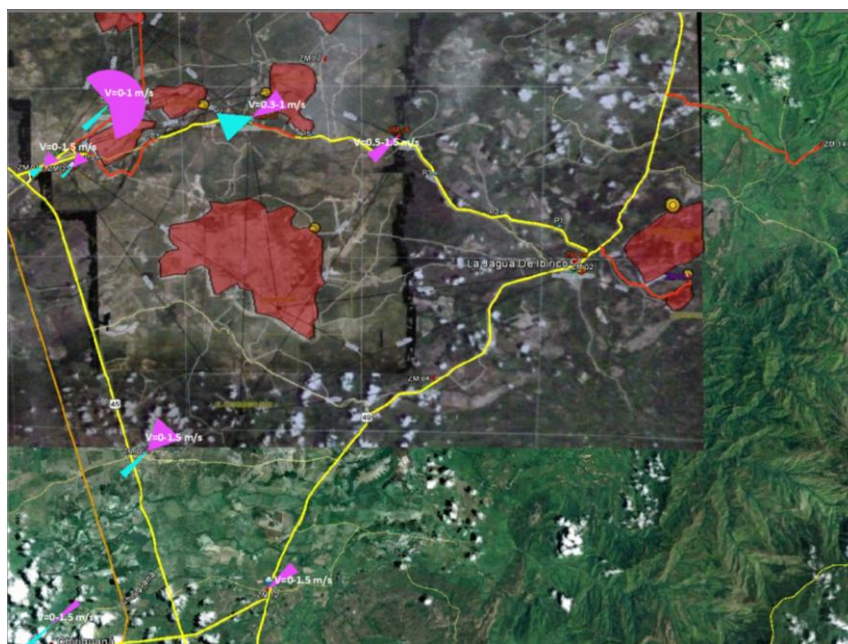
Vel prob= Velocidad mas probable.

¹Para estas estaciones no se estudió la relación con al dirección del viento debido a que esta variable para la estación Cerrolargo no caracteriza apropiadamente la zona.

Fuente: El Autor

El análisis presentado anteriormente también fue realizado para el periodo 1 (enero-febrero) según la asignación meteorológica planteada en la Tabla 16, en este caso no se registran resultados concluyentes para la dirección del viento debido al bajo volumen de datos, sin embargo para concentraciones de TSP vs. velocidad se registra tendencia contraria a lo registrado para todo el conjunto de datos, donde las concentraciones disminuyen con el incremento de la velocidad para la mayoría de las estaciones (excepto ZM5) hasta velocidades cercanas a 2.5 m/s y a partir de este valor las concentraciones se incrementan, lo que posiblemente esté asociado a resuspensión.

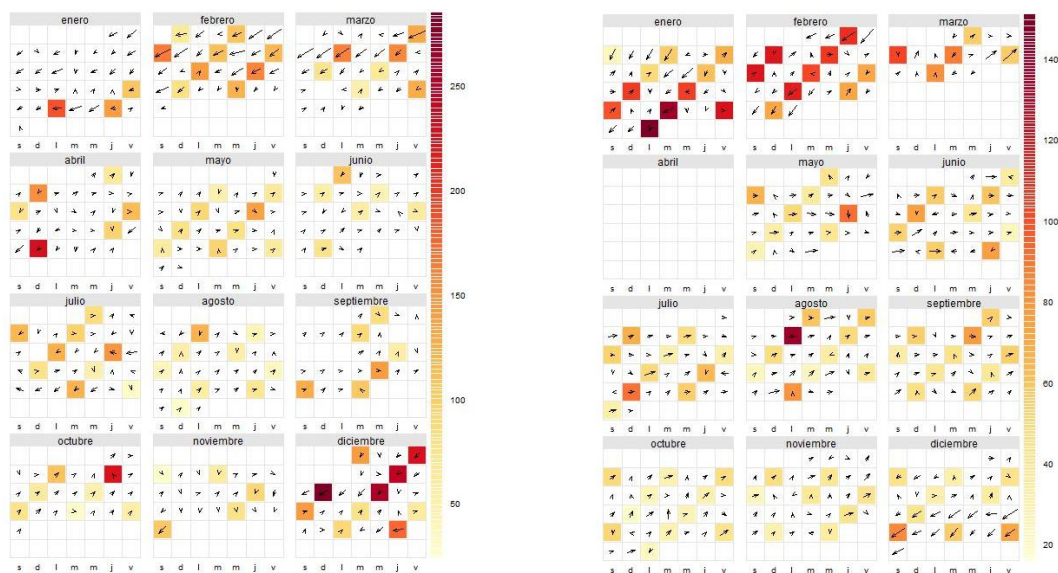
Por otra parte para verificar la correspondencia de las condiciones meteorológicas con los niveles de PM se construyeron calendarios de concentraciones en el que la intensidad del color indica la contracción de partículas y la flecha la dirección y magnitud de la velocidad del viento. Como resultado de esto se observó que la asignación meteorológica registra concordancia con las posibles fuentes.



En color magenta están representadas las direcciones de las mayores concentraciones y en azul las menores, la velocidad corresponde a la más probable para la dirección de las máximas concentraciones.

Figura 51 Direcciones de máximas y mínimas concentraciones
Fuente: El Autor

En la Figura 52 se presenta un ejemplo de esto calendarios.



a) Calendario de concentración de PM₁₀ 2009 b) Calendario de concentración de PM₁₀ 2011

Figura 52 Calendarios de concentración para la estación ZM3 La Loma 2 - PM₁₀

Fuente: El Autor

4.5 ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES ENTRE VARIABLES METEOROLÓGICAS Y NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO.

4.5.1 Correlación entre las estaciones de medición de calidad de aire

La correlación entre estaciones puede indicar afectación de fuentes comunes. Para este caso de estudio se observa un incremento en la correlación entre las estaciones con el aumento en las precipitaciones, registrándose el mayor número de estaciones correlacionadas durante el periodo 3 (marzo – diciembre de 2010) y escasas correlaciones en el periodo 1.

Por otra parte se registran altas correlaciones entre estaciones distantes y sin aparente relación, lo que sugiere que las altas correlaciones durante las épocas de mayor precipitación pueden ser generadas por disminución generalizada de las concentraciones y la menor variabilidad de los datos debido a factores meteorológicos que generan impacto regional, lo que indicaría una fuerte

dependencia común de las estaciones de calidad de aire respecto a la variabilidad climática y que el impacto de esta variabilidad es significativo para la zona.

Durante la época seca se registra baja correlación entre las concentraciones de las estaciones de lo cual se puede inferir que hay un aporte diferente para cada estación de fuentes particulares, esta situación puede estar asociada con resuspensión generada en inmediaciones de las estaciones o con la combinación de factores meteorológicos, localización de las estaciones y aporte de las fuentes.

Para un periodo en el que la resuspensión esta controlada pero las precipitaciones no son abundantes, las estaciones localizadas cerca al corregimiento de la Loma (ZM1, ZM3, ZM13) registran buena correlación. Además las estaciones ubicadas en La Loma (ZM1, ZM3) presentan buena correlación con la estación localizada en el corregimiento de Plan Bonito (ZM7) lo que puede indicar que estas estaciones están impactadas por fuentes similares.

Cuando hay importante presencia de precipitaciones la variabilidad de las concentraciones se reduce y las correlaciones aumentan en general para toda la zona, esto puede estar relacionado con la mitigación de un factor regional; durante esta época la estación ZM9 La Jagua Vía no registra correlación con ninguna estación lo que indica que esta estación esta afectada por una fuente local y las variaciones meteorológicas regionales no la afectan de igual forma que al resto de estaciones. La diferencia en el comportamiento de esta estación también es señalada por Hernández (2012), de acuerdo con la composición química del material particulado monitoreado en esta estación. Las estaciones que registran las mejores correlaciones son las localizadas en inmediaciones del corregimiento de La Loma y la estación ZM5 La Aurora con ZM12 Rincón Hondo. En la Figura 53 se presentan algunas de las gráficas con sus correspondientes coeficientes de correlación; el conjunto completo de gráficos se presenta en el Anexo C apartado C3 y C4.

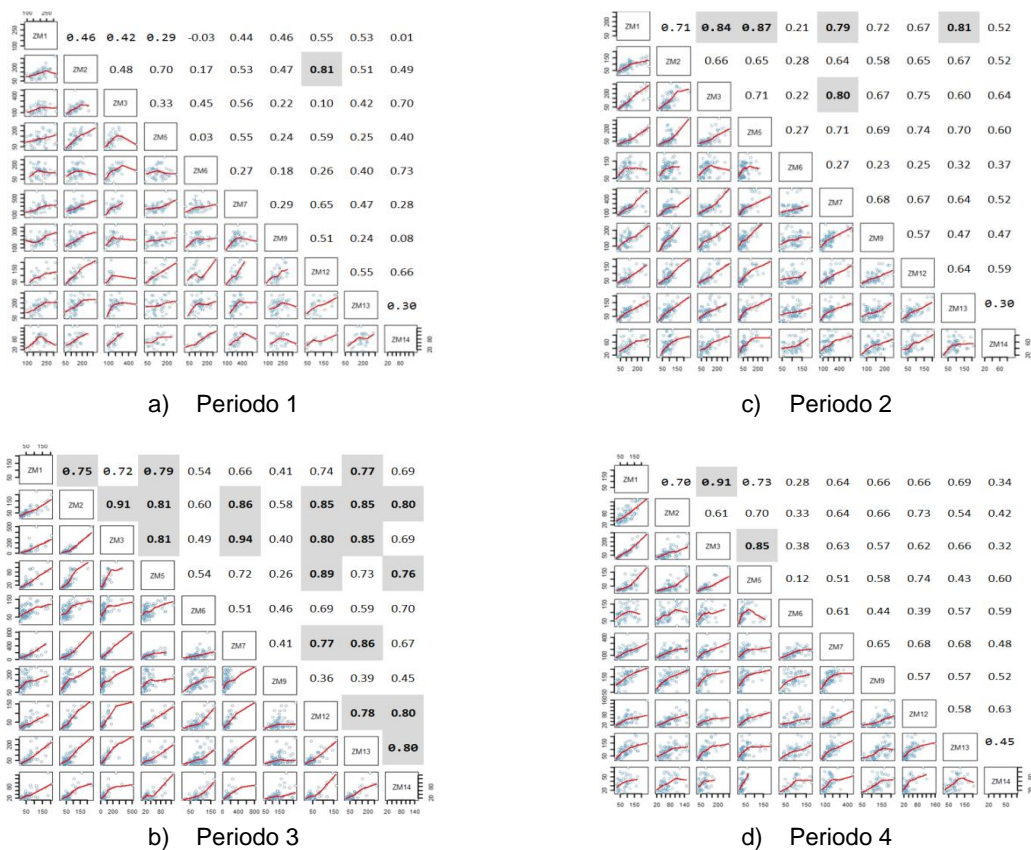


Figura 53 Gráficos de correlación entre estaciones de TSP

Fuente: El Autor

4.5.2 Relación entre concentración y radiación solar global.



Figura 54 Serie de tiempo de la radiación solar global horaria (w/m^2)

Fuente: El Autor

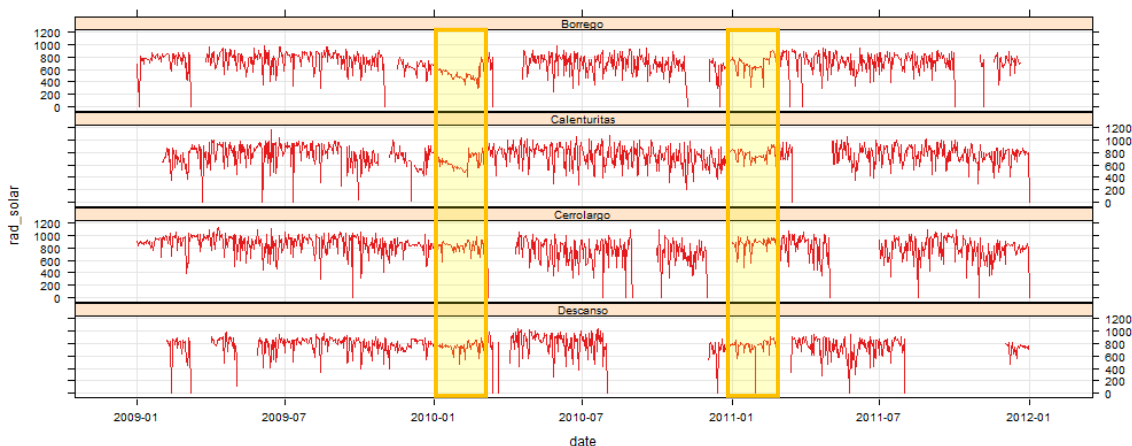


Figura 55 Máximo diario de la radiación global horaria promedio (w/m^2)

Fuente: El Autor

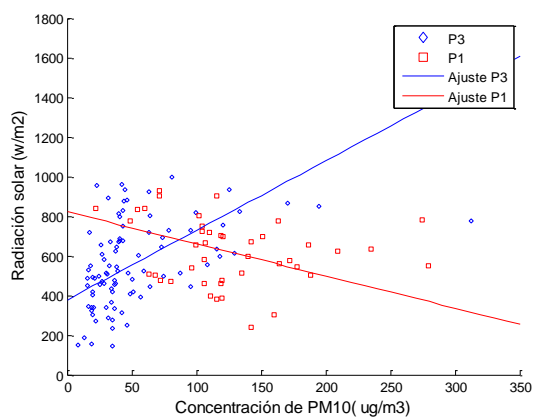
En el apartado 4.2.2 se observó que para el periodo 1 se registra el mayor intervalo de variación entre la temperatura de las primeras horas de la mañana y la temperatura pasado el medio día, esto sugiere que durante este periodo generalmente los días son despejados. Sin embargo en las series de tiempo de radiación solar (Figura 54 y Figura 55) se observa un importante descenso de la radiación para este periodo, situación particularmente extraña. Al no encontrarse indicios de que este comportamiento estuviese relacionado con algún evento meteorológico se realizó una comparación de la radiación registrada a las 12:00 horas por las estaciones meteorológicas y la concentración diaria de PM_{10} registrada por los muestreadores de calidad de aire según la asignación propuesta en la Tabla 16 encontrándose que con el incremento en las concentraciones la radiación disminuye (Figura 57). Este fenómeno puede estar relacionado con dos aspectos: problemas de medición causados por bajo mantenimiento de las estaciones localizadas dentro de los proyectos mineros o atenuación de radiación por partículas debida principalmente a difusión Mie (Mie scattering). Por otra parte el SEVCA_ZCC ha reportado eventos de importantes cantidades de PM suspendido tal como se muestra en la Figura 56.



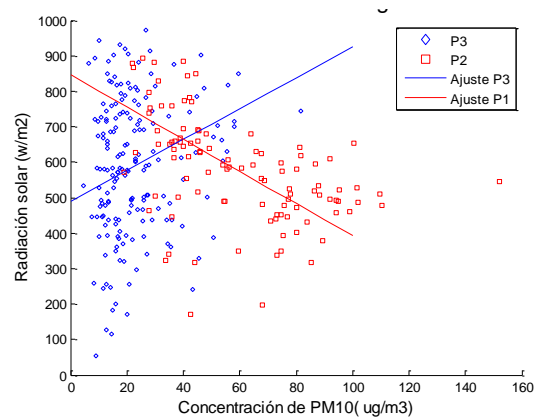
a) PM suspendido, fotografía tomada desde la estación ZM3

b) PM suspendido, fotografía tomada desde la estación ZM9

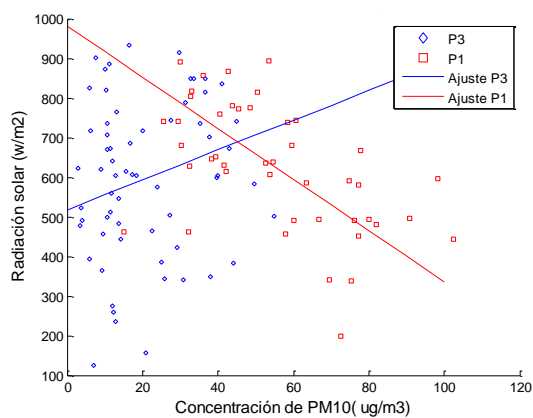
Figura 56 Registro fotográfico de material particulado suspendido en la ZCC, enero y febrero de 2012
 Fuente: SEVCA_ZCC



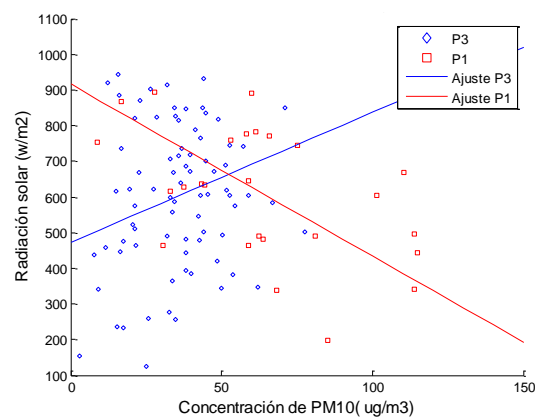
a) ZM7 Plan Bonito – Calenturitas



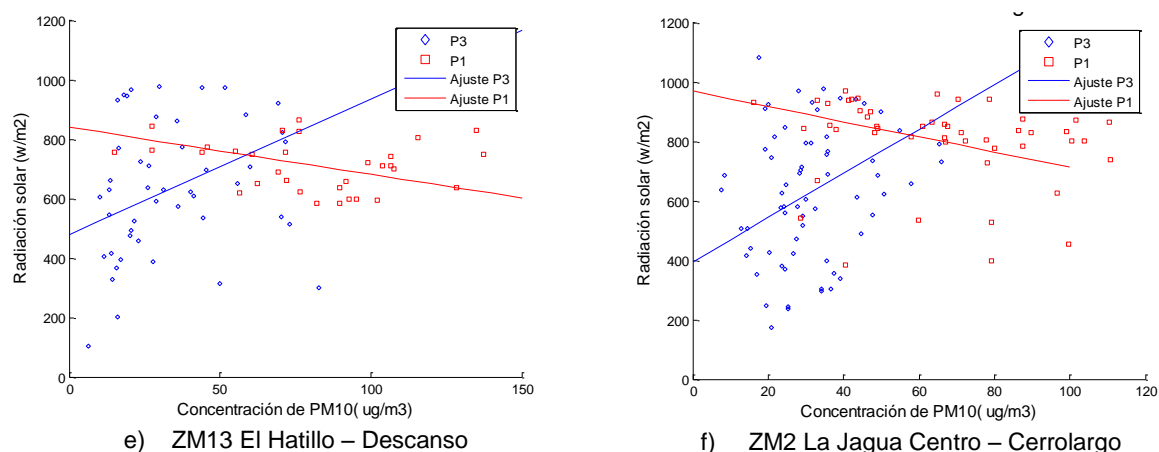
b) ZM3 La Loma 2 – Borrego



c) ZM5 La Aurora – Borrego



d) ZM6 Boquerón – Borrego



En color rojo se presentan los datos y la línea de tendencia para el periodo 1; en azul los datos y línea de tendencia para el periodo 3. En el periodo 1 se observa tendencia a la disminución en la radiación con el incremento en la concentración; un comportamiento contrario se registró para el periodo 3.

Figura 57 Relación entre radiación solar y concentración de PM₁₀

Fuente: El Autor

4.5.3 Relación entre condiciones meteorológicas globales y concentración de PM

Se aprecia tendencias similares entre el índice oceánico del niño (ONI) y las fluctuaciones de los promedio móviles de las concentraciones de PM. Esta similitud ratifica el impacto de las variaciones meteorológicas en los niveles de PM en la ZCC, sin embargo no se registra plena correspondencia lo que implica que el ONI no explica en su totalidad la variabilidad de los niveles de PM.

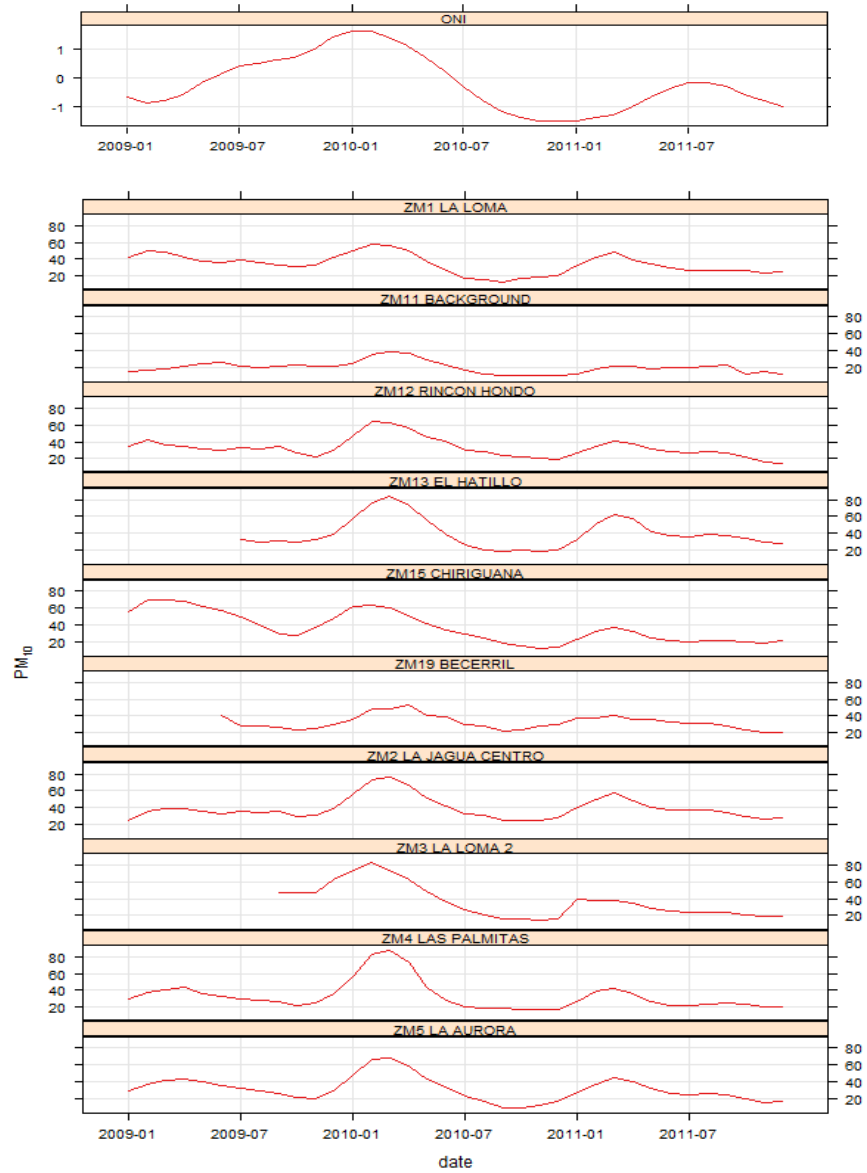


Figura 58 promedio trimestral móvil para las estaciones de fondo PM₁₀ y ONI
Fuente: El Autor

5. CONCLUSIONES

Los niveles de PM en la ZCC registran importante relación con las condiciones meteorológicas de la zona. La precipitación, velocidad y dirección del viento son las variables primarias más relevantes. Las importantes variaciones en los niveles de PM registradas durante los últimos años muy probablemente sean debidas principalmente a factores meteorológicos.

Es altamente probable que en la zona se registren procesos de acumulación de PM en la atmósfera, lo que se fundamenta en el comportamiento de la radiación durante la época seca, los eventos reportados por el SEVCA_ZCC y el incremento de las concentraciones con el paso de los días hasta un evento de precipitación.

La meteorología en la zona es compleja, los análisis estadísticos representan adecuadamente el comportamiento de las variables escalares tales como temperatura, radiación y humedad pero no son representativos para la variable vectorial (velocidad y dirección del viento) debido a que se presentan patrones diarios difíciles de predecir, la fuerza de coriolis tiene baja magnitud y existe una compleja interacción entre fenómenos sinópticos y térmicos acompañados de convección húmeda. Lo anterior hace susceptible de evaluar los escenarios de pronóstico a partir de modelos computacionales.

En el área de estudio las direcciones que registran las mayores frecuencias son las provenientes del NE y SW. Durante las horas diurnas se registran importantes variaciones en la velocidad y dirección del viento, comportamiento que posiblemente está relacionado con efectos generados por la ZCIT, la interacción con fenómenos sinópticos del caribe y efecto local generado por la variación de temperatura y presión.

Durante la época seca la ZCC se encuentra al sur de la ZCIT causando la intensificación de vientos del NE. Por otra parte durante el periodo húmedo la

ZCIT se encuentra sobre el área de estudio lo que conlleva a disminución en la intensidad de los vientos. Esto explica la gran diferencia estacional de los vientos.

Respecto al comportamiento de las concentraciones de PM en la zona se registra una importante relación con precipitación, sin embargo hay días con concentraciones bajas y precipitación cero. Este comportamiento corresponde principalmente a días durante la época húmeda que probablemente se generan después de un día de precipitación. Lo anterior indica que el fenómeno tiene memoria lo que hace que su análisis sea más complejo.

Los meses de mayores concentraciones corresponden a enero y febrero y los de menores a octubre y noviembre, durante los meses de marzo, abril y diciembre se presentan la transición entre las concentraciones altas y bajas.

En general para las estaciones de calidad de aire localizadas en la zona, las mayores concentraciones se registran en las estaciones de efecto de tráfico (ZM7 Plan Bonito, ZM9 Jagua Vía, ZM6 Boquerón) y en las estaciones de fondo urbano ZM1 La Loma Centro, ZM3 La Loma 2 y ZM13 El Hatillo.

Según el coeficiente 'C_i' del modelo de regresión lineal para la estimación de concentraciones promedio mensuales, para meses con precipitación cercana a cero para la variable TSP solo las estaciones ZM2 La Jagua Centro, ZM14 Estados Unidos, ZM5 La Aurora y ZM12 Rincón Hondo no tendrían promedio mensual superior a 100 µg/m³, mientras que para la variable PM₁₀ las estaciones que no tendrían promedio mensual superior a 50 µg/m³ serían ZM2 La Jagua Centro, ZM5 La Aurora, ZM11 Minguillo, ZM12 Rincón Hondo y ZM19 Becerril.

En general el modelo de deposición húmeda describe bastante bien la relación entre concentración de PM y precipitación para los contaminantes TSP y PM₁₀ en la mayoría de las estaciones. Es de destacar este buen desempeño ya que se utilizaron datos diarios con alta variabilidad.

La estación ZM11 Minguillo se clasifica como la estación de referencia, las concentraciones en esta son relativamente altas, lo que indica un aporte regional

importante, que para el parámetro PM_{10} es cercana a los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con base en lo anterior se puede estimar que aproximadamente el aporte de las actividades desarrolladas en la zona de estudio es de 10 a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a los promedios mensuales de las concentración de PM_{10} en las estaciones de fondo, y el aporte en las estaciones de trafico oscila aproximadamente entre 30 y $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Se registra una importante correlación entre varias estaciones de calidad de aire y la precipitación reportada por la estación Borrego aun cuando la estación de calidad de aire se encuentra mas cerca de otra estación meteorológica, esto podría estar relacionado con la mitigación de una fuente en los alrededores de la estación Borrego.

La estación ZM9 La Jagua Vía registra un comportamiento diferente con respecto al resto de estaciones del sistema de vigilancia, lo que se ratifica con las diferencias en la composición química del PM reportada por Hernández, 2012.

6. RECOMENDACIONES

La gestión de información y la construcción de metadatos son cruciales para garantizar la calidad de los productos y decisiones tomadas a partir del análisis de estos, es por esto que es indispensable iniciar un proceso de documentación de la información meteorológica de la zona para garantizar la calidad de estos datos.

La calidad del aire de la ZCC depende en gran medida de las condiciones meteorológicas en la zona, es por esto que el contar con información de calidad de este conjunto de variables es de gran importancia para todos los actores; por lo anterior se recomienda implementar acciones de corto, mediano y largo plazo para garantizar la calidad de la información meteorológica de la zona.

A continuación se presentan algunas de estas recomendaciones

Corto plazo o inmediatas

- Generar la hoja de vida de las estaciones y contar con una bitácora de mantenimiento en la que se registren todas las intervenciones realizadas al equipo, incluido los parámetros utilizados al momento de instalación de la estación, reporte de eventualidades en el funcionamiento, entre otros.
- Estandarizar el proceso de descarga de datos incluyendo las unidades para cada una de las variables monitoreadas.
- Mejorar las condiciones de instalación de las estaciones, en especial la del sensor de velocidad y dirección del viento, en cuanto a su altura, obstáculos cercanos y posible afectación debido a la estructura en donde se encuentra instalado, etc. Para los demás sensores se recomienda instalarlos sobre un mástil de 2m sin obstáculos mínimo a 4m.

Mediano plazo

- Realizar una renovación de la instrumentación por equipos de mejores prestaciones con medición de dirección del viento en grados, que puedan ser calibrados y que generen información confiable para el propósito de estudios ambientales de calidad de aire.
- Realizar medición de velocidad del viento, dirección del viento y precipitación en las estaciones de calidad de aire.

Lago plazo

- Integrar las estaciones meteorológicas a un sistema centralizado de datos con el objeto de poder realizar pronósticos y optimizar las medidas de mitigación a realizar en la zona, incorporando a este componente como una herramienta de apoyo y planeación para la toma de decisiones día a día.

Con el propósito de comprender mejor el comportamiento de las variables meteorológicas de la zona en especial de viento se recomienda desarrollar un estudio en el que se descompongan las variables meteorológicas en sus componentes de tendencia, estacional y restantes con el propósito de identificar los eventos sinópticos que posiblemente han afectado la zona minera.

Es reconocido que en procesos de explotación de minas a cielo abierto el transporte puede aportar cerca del 70 – 80 % de las emisiones de PM a la atmósfera, es por esto que es importante involucrar dentro de las herramientas de planificación de las actividades de riego sobre las vías elementos cuantitativos que permitan determinar la frecuencia de los vehículos de riego a lo largo del día debido a la importante diferencia de temperaturas que se registran entre las diferentes horas; estos elementos pueden estar acoplados con información de las estaciones meteorológicas de la zona.

Se recomienda evaluar la incidencia del número de eventos de precipitación comparada con las concentraciones.

Desarrollo de una herramienta para la gestión del riego en la zona, cálculo de las frecuencias con base en factores meteorológicos y niveles de PM. (Gestión de vehículos capacitados).

Desarrollo de proyectos de investigación encaminados al control de las emisiones y niveles de PM enfocado principalmente en las vías y resuspensión mecánica.

7. BIBLIOGRAFÍA

Benavides, H. 2003. Pronóstico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias, Departamento de Geociencias.

Bhaskar, B., Mehta, V. 2010. Atmospheric particulate pollutants and their relationship with meteorology in Ahmedabad. *Aerosol and Air Quality Research*, 10, 301-315.

Carslaw, D., Ropkins, K. 2012 openair --- an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*. Volume 27-28, 52-61.

Çelík, M., Kadi, Í. 2007. The relation between meteorological factors and pollutants concentrations in Karabük city. *G.U. Journal of Science*, 20(4), 87-95.

Correa, M., Zuluaga, C., Palacio, C., Pérez, J., Jiménez, J. 2009. Acoplamiento de la atmósfera libre con el campo de vientos locales en una región tropical de topografía compleja. Caso de estudio: Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia. *Dyna*, 158, 17-27.

Estévez, J., Gavilán, P., Giráldez, J., 2011. Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology*, 402, 144-154

Fisch, G. 2009. Atmospheric Boundary Layer En: Moreira D., Vilhena, M. *Air Pollution and Turbulence, Modeling and Applications*. CRC Press

Giri, D., Murthy, K., Adhikary, P. 2008. The influence of meteorological conditions on PM10 concentrations in Kathmandu Valley. *Int. J. Environ. Res*, 2, 49-60.

Godish, T. 1997. *Air quality*. CRC Press

Huertas, J., Camacho, D., Huertas, M. 2012. Standardized emissions inventory methodology for open-pit mining areas. *Environmental Science and Pollution Research*, in press.

Jones, A., Harrison, R., Baker, J. 2010. The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x. *Atmospheric Environment*, 44, 1682-1690.

Kassomenos, P., Flocas, H., Lykoudis, S., Skouloudis, A. 1998. Spatial and temporal characteristics of the relationship between air quality status and mesoscale circulation over and urban Mediterranean basin. *The Science of the Total Environment*, 217, 37-57

Laing, A., Evans, J. 2011. *Introducción a la meteorología tropical*, (en línea). The Comet Program.

Mues, A., Manders, A., Schaap, A., Kerschbaumer, A., Stem, R., Builtjes, P. 2012. Impact of the extreme meteorological conditions during the summer 2003 in Europe on particulate matter concentrations. *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.03.002

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT. 2010. Resolución 610, por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006.

R Development Core Team (2012). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Seinfeld, J., Pandis, S. 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Second Edition. New Jersey. John Wiley & Sons Inc.

Statheropoulos, M., Vassiliadis, N., Pappa, A., 1998. Principal component and canonical correlation analysis for examining air pollution and meteorological data. *Atmospheric Environment*, 32, 1087- 1095.

Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2006. Atlas de viento y energía eólica en Colombia. Bogotá.

Vejen, F., Jacobsson, C., Fredriksson, U., Moe, M., Andresen, L., Hellsten, E., Rissanen, P., Pálsdóttir, P., Arason, P. 2002. Quality control of meteorological observations, automatic methods used in the Nordic countries. Norwegian Meteorological Institute.

Wise, E. Comrie, A. 2005. Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States. *Atmospheric Environment*, 39, 2969-2980.

Watson, J., Chow, J., Chen, L., Wang, X. 2010. Measurement system evaluation for fugitive dust emissions detection and quantification. Preparado por Desert Research Institute.

Zaharim A., Shahrudin M., Nor, J. Karim, O., Sopian K. 2009. Relationships between airborne particulate matter and meteorological variables using non-decimated wavelet transform. *European Journal of Scientific Research*, 27, 308-312.

Zahumensky, I. 2004. Guidelines on Quality Control Procedures for data from automatic weather stations. World Meteorological Organization.

U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), Code of Federal Regulations. 1983. Title 40, Appendix B to Chapter 50, Reference method for the determination of suspended particulate matter in the atmosphere (High-Volume Method).

U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2005. Basic air pollution meteorology. APTI Course SI 409. www.epa.gov/apt

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2001. Manual del observador meteorológico. Medellín.

8. ANEXOS

Anexo A Fichas de las estaciones meteorológicas

A1 Estación Borrego

A.1.1 Series de tiempo

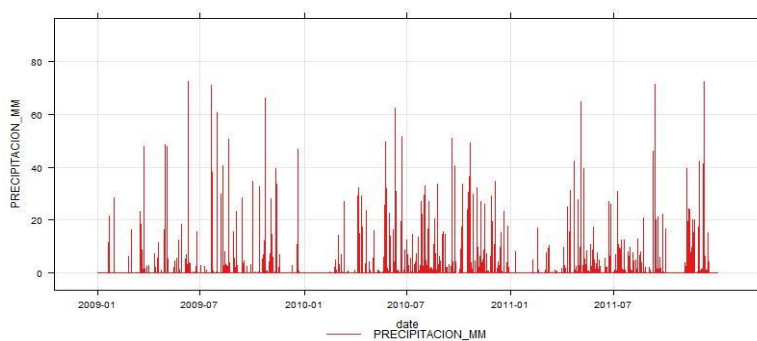


Figura 59 Precipitación horaria estación Borrego [mm]

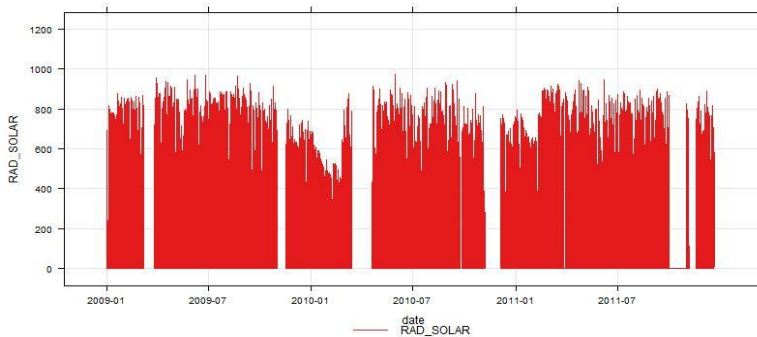


Figura 60 Radiación solar global horaria estación Borrego [w/m^2]

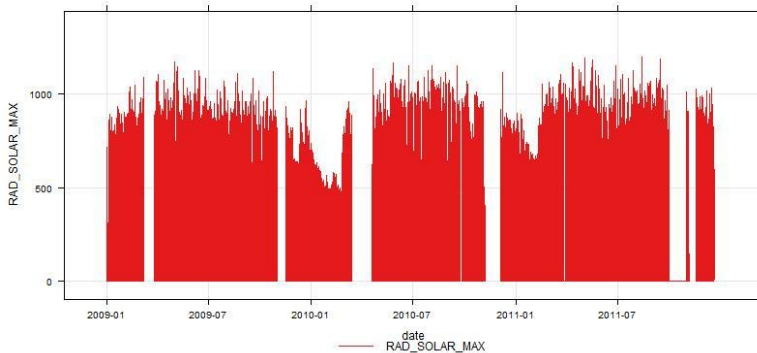


Figura 61 Radiación solar máxima horaria estación Borrego [w/m^2]

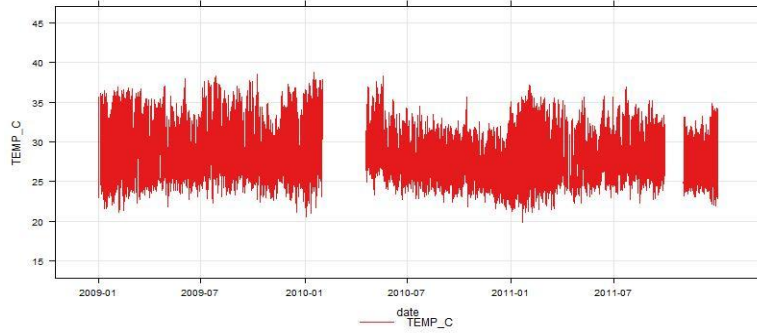


Figura 62 Temperatura promedio horaria estación Borrego [°C]

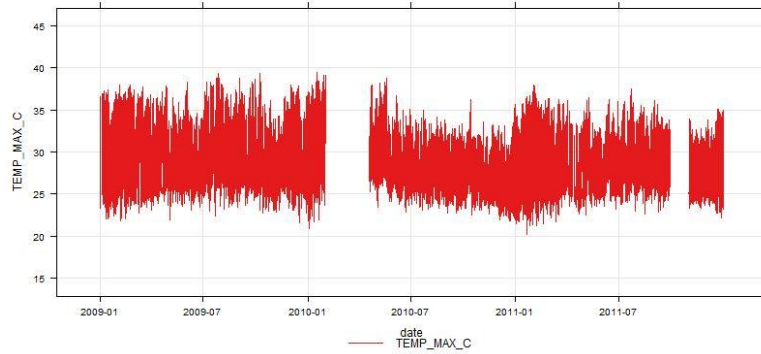


Figura 63 Temperatura máxima horaria estación Borrego [°C]

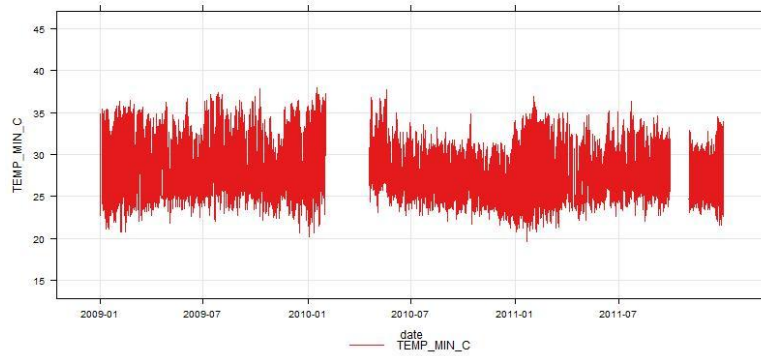


Figura 64 Temperatura mínima horaria estación Borrego [°C]

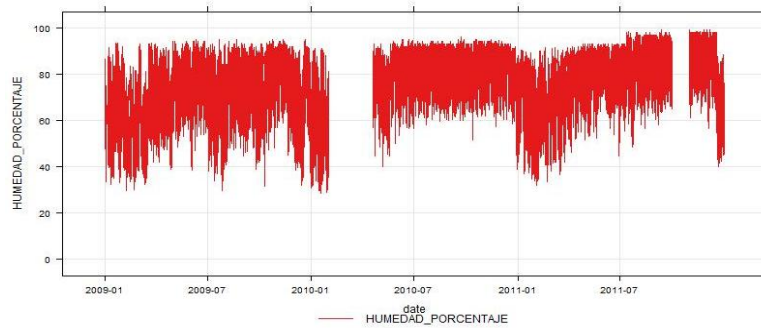


Figura 65 Humedad relativa horaria estación Borrego [%]

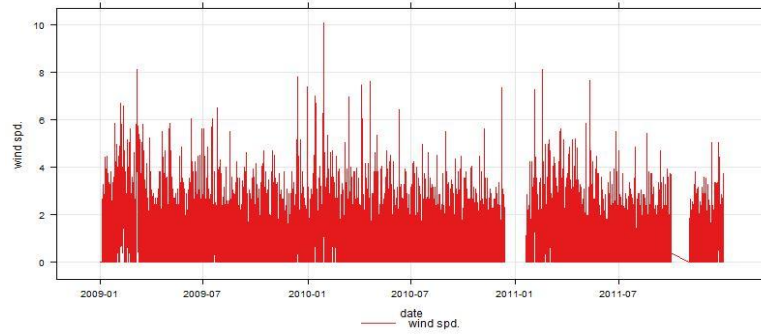


Figura 66 Velocidad del viento horaria estación Borrego [m/s]

A.1.2 Comportamiento horario de variables meteorológicas (diagramas de cajas)

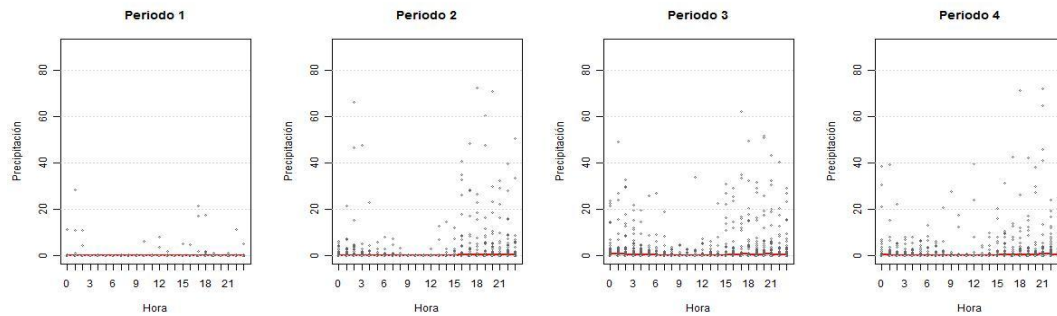


Figura 67 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Borrego [mm]

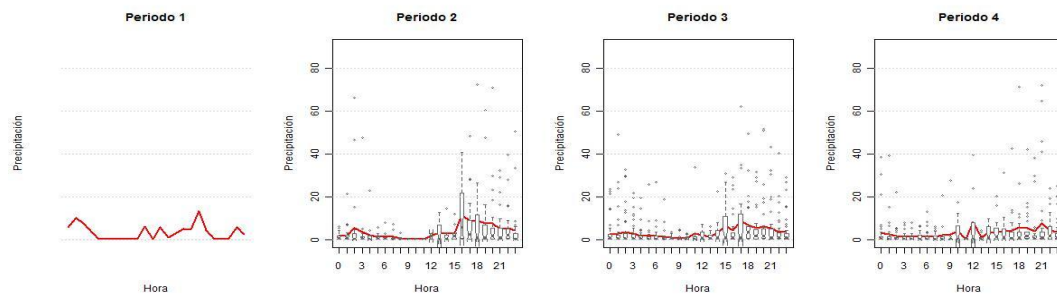


Figura 68 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Borrego (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]

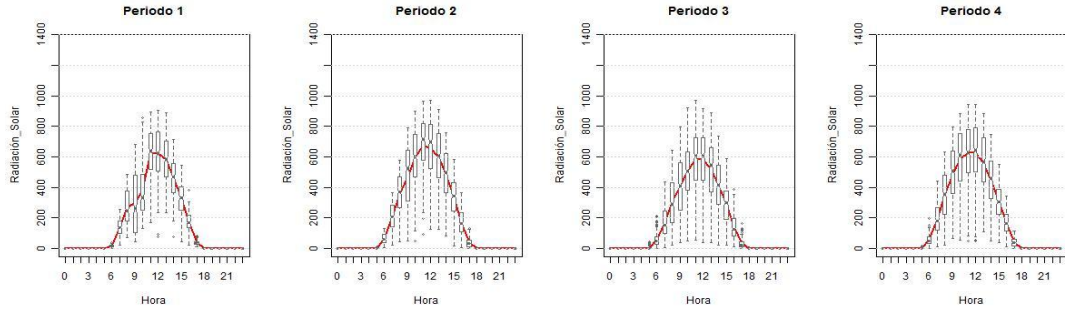


Figura 69 Diagrama de cajas radiación solar global estación Borrego [w/m²]

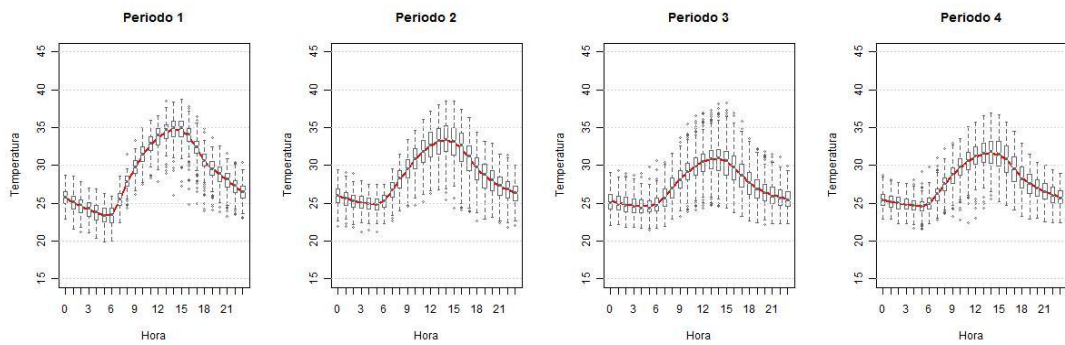


Figura -70 Diagrama de cajas temperatura estación Borrego [°C]

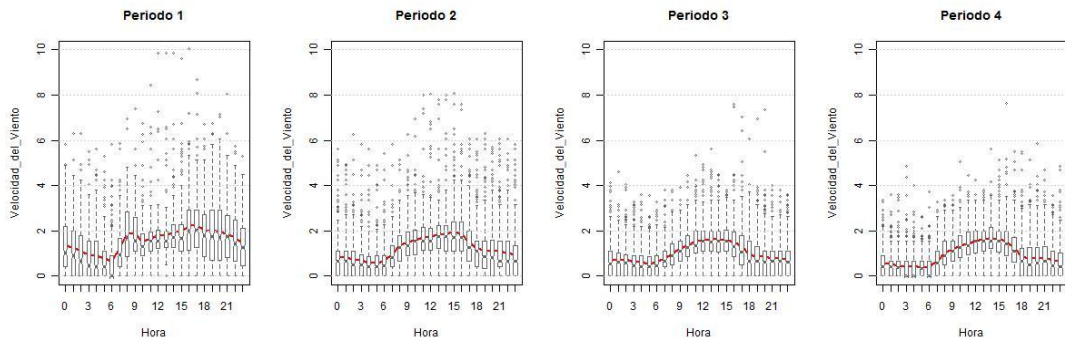


Figura 71 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Borrego [m/s]

A.1.3 Comportamiento del viento

A.1.3.1 Rosas de viento por periodo

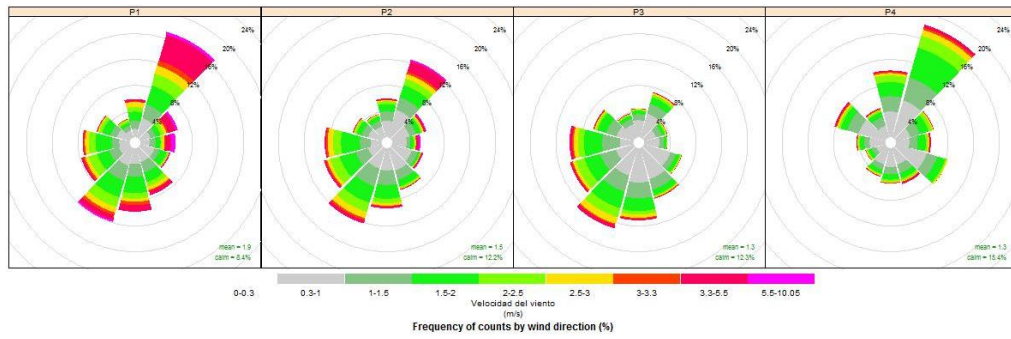


Figura -72 Rosa de vientos total por periodo estación Borrego

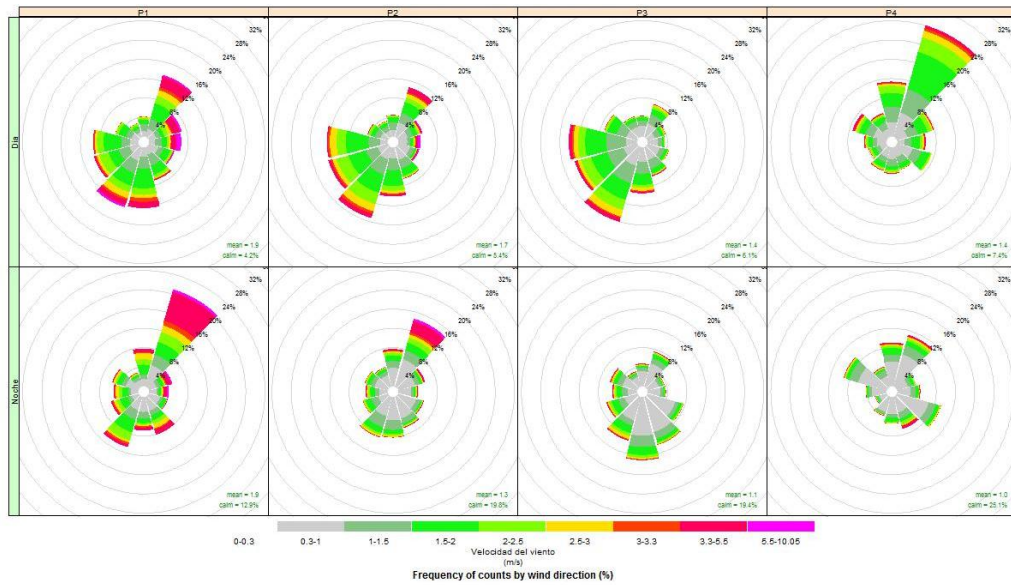


Figura 73 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Borrego

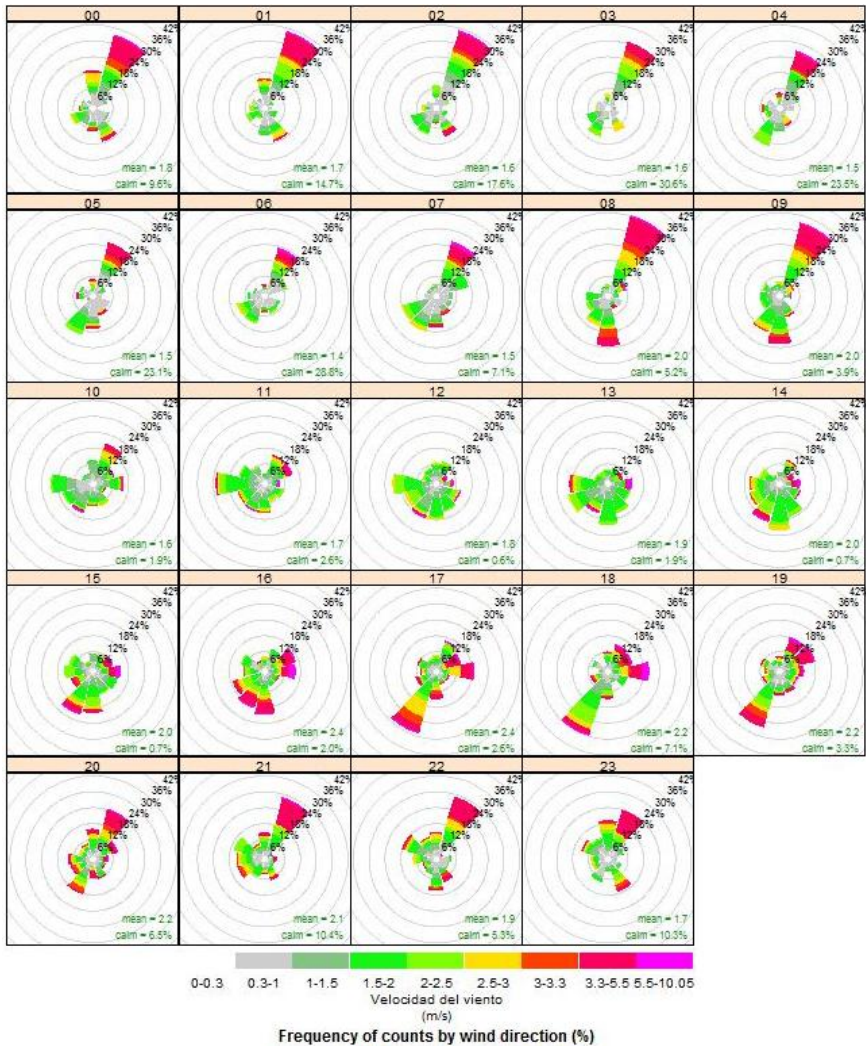


Figura 74 Rosas de viento por horas periodo 1 estación Borrego

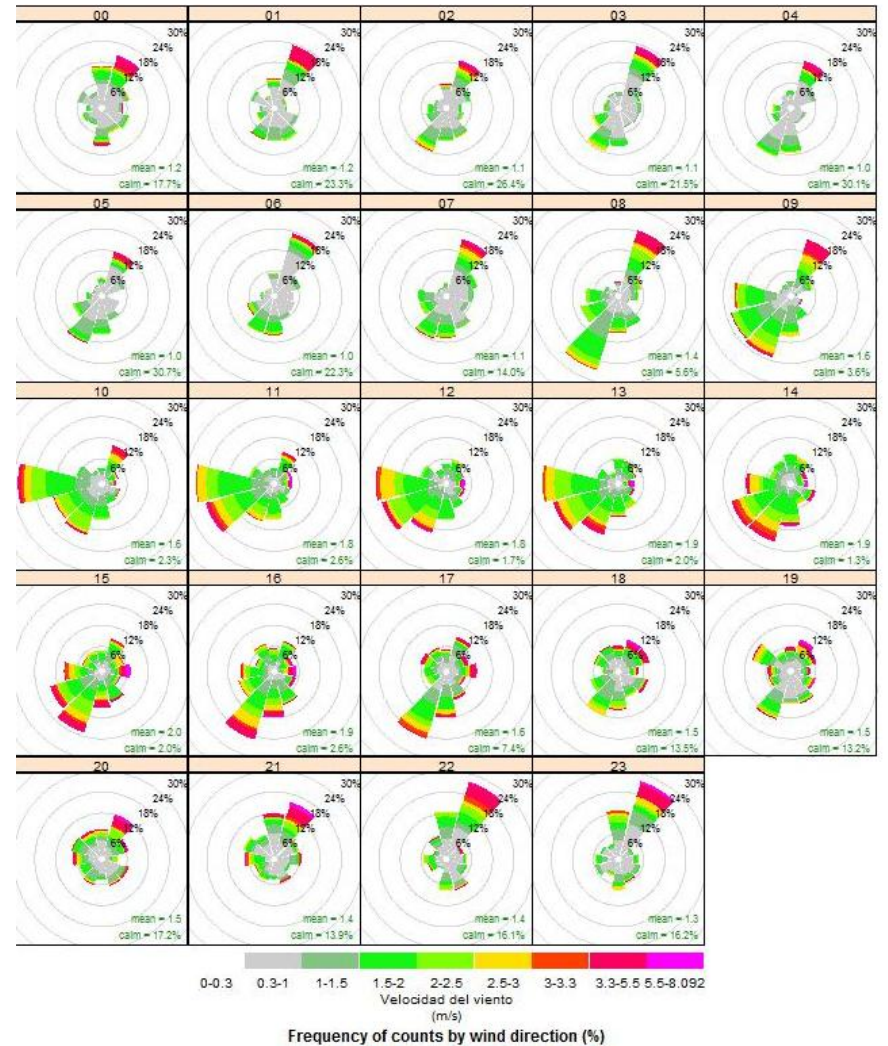


Figura -75 Rosas de viento por horas periodo 2 estación Borrego

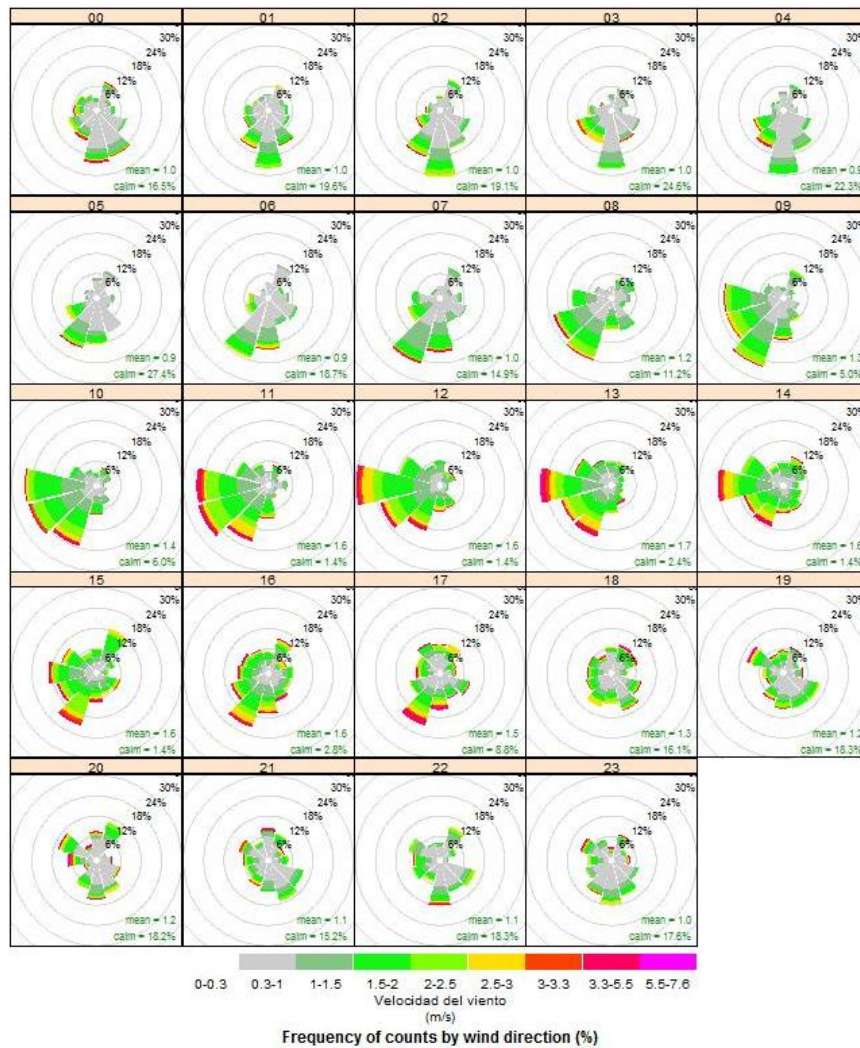


Figura -76 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Borrego

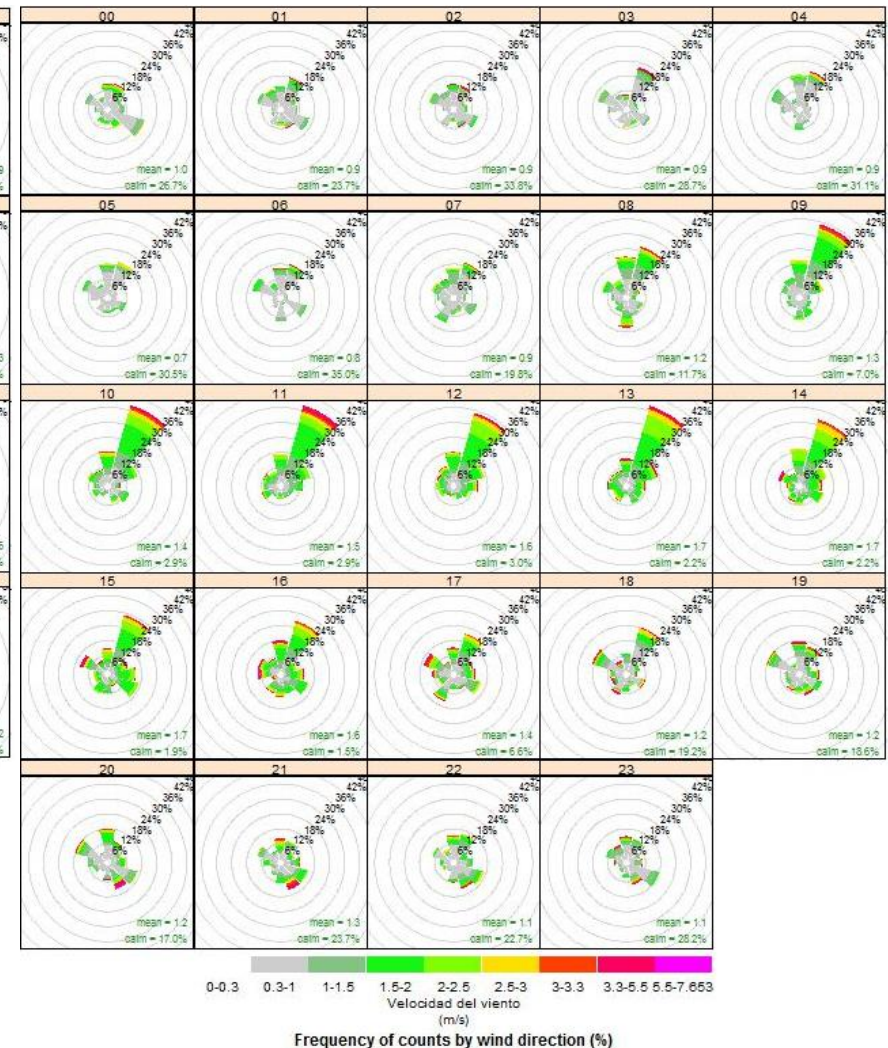


Figura 77 Rosas de viento periodo 4 estación Borrego

A.1.3.2 Rosas de frecuencia por periodo

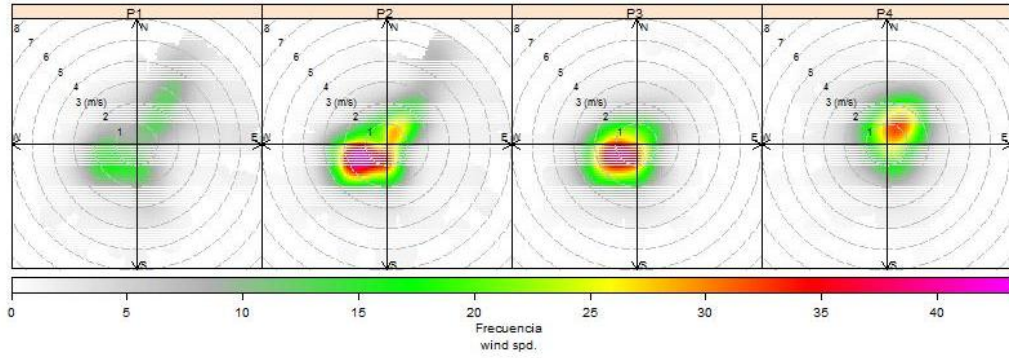


Figura 78 Rosa de frecuencia total por periodos estación Borrego

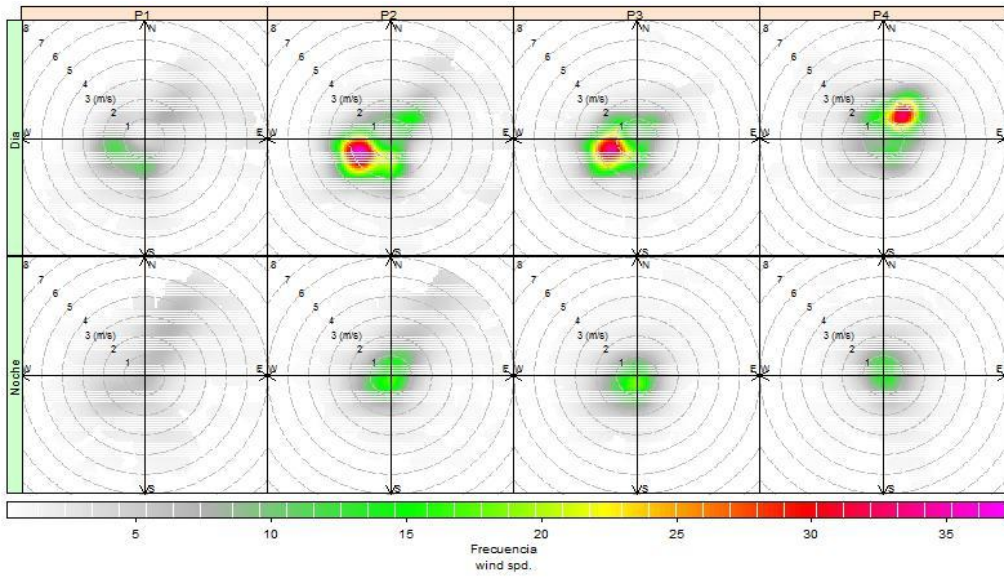


Figura 79 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo Estación Borrego

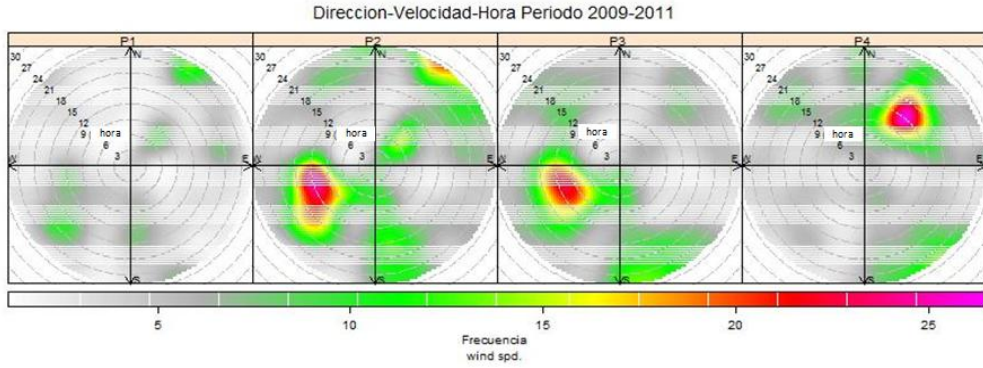


Figura 80 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Borrego

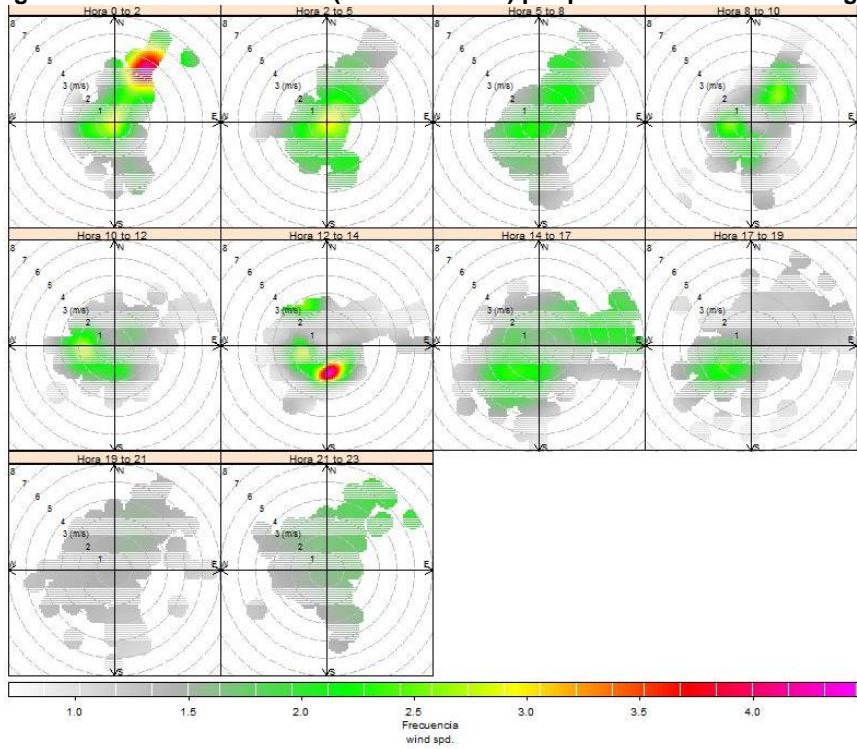


Figura 81 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Borrego

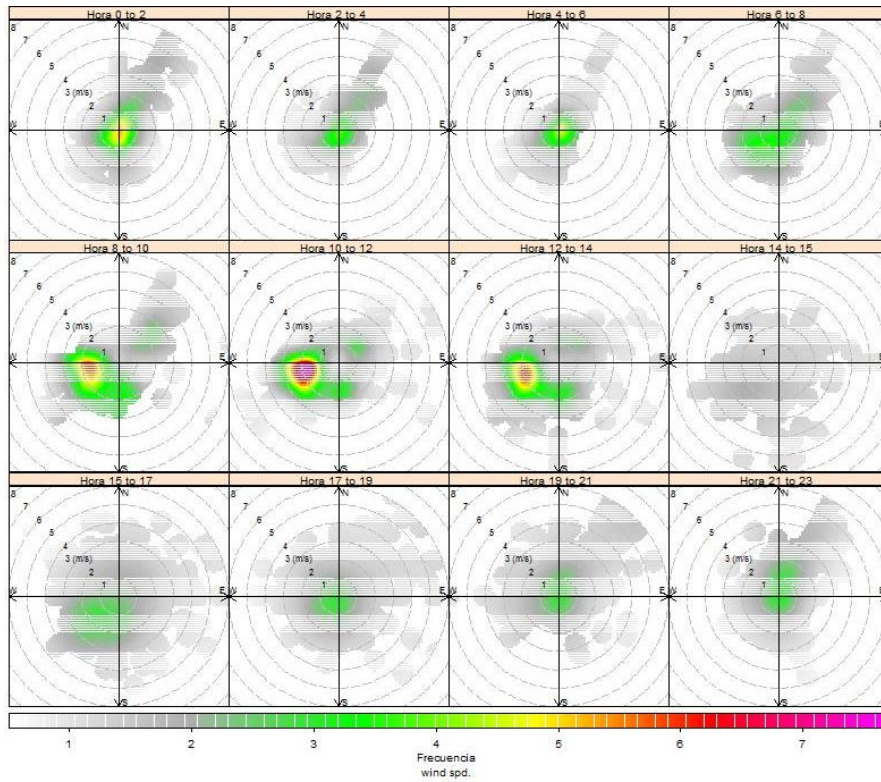


Figura 82 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Borrego

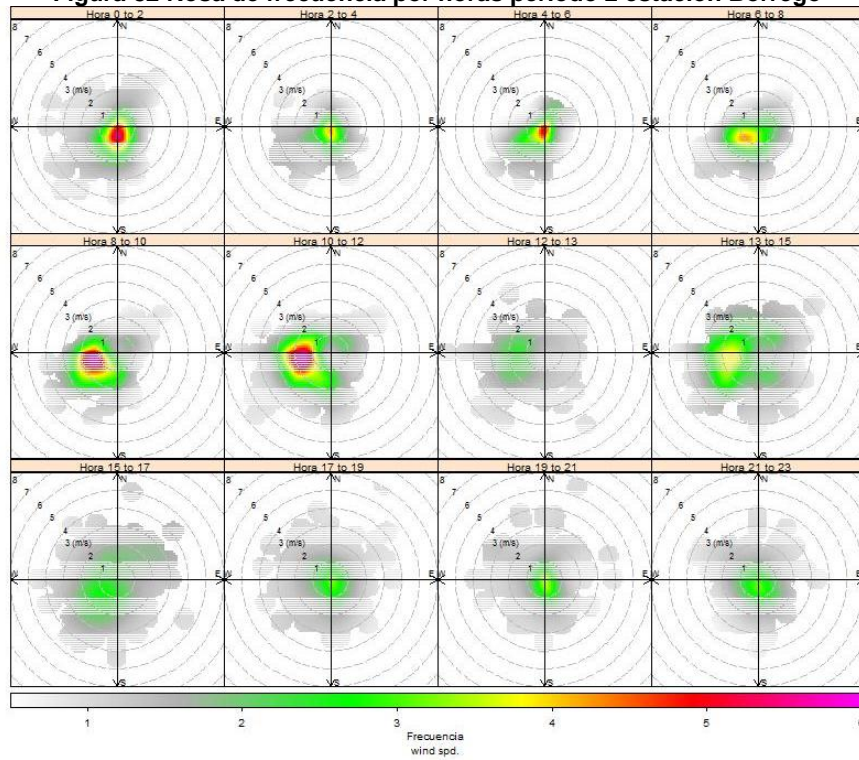


Figura 83 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación Borrego

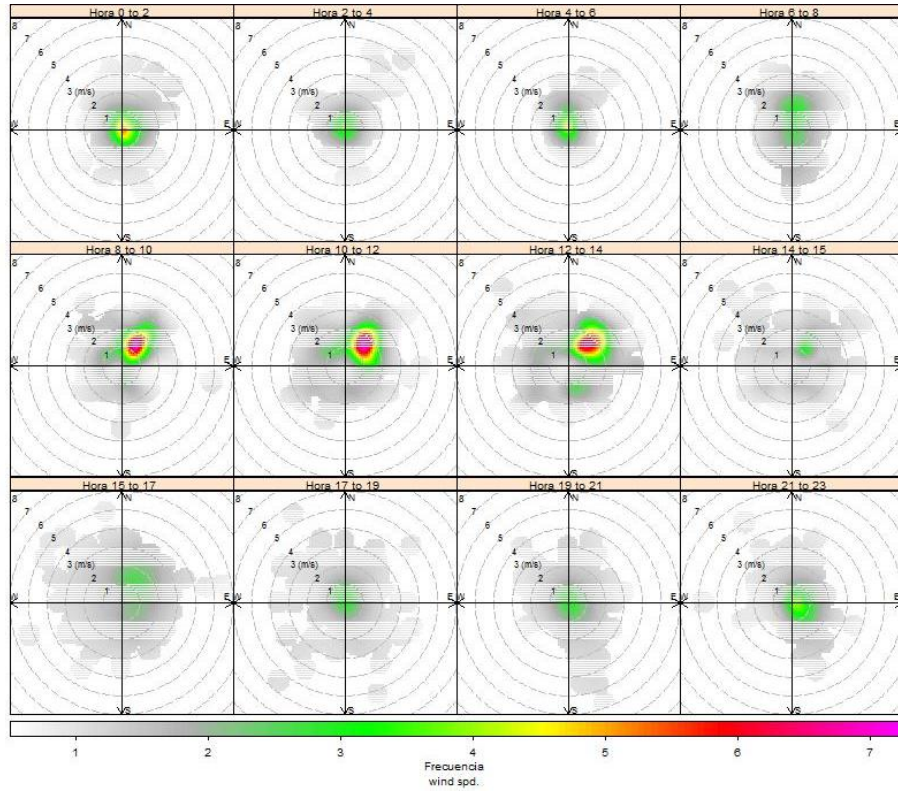


Figura 84 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Borrego

A2 Estación Cerrolargo

A.2.1 Series de tiempo

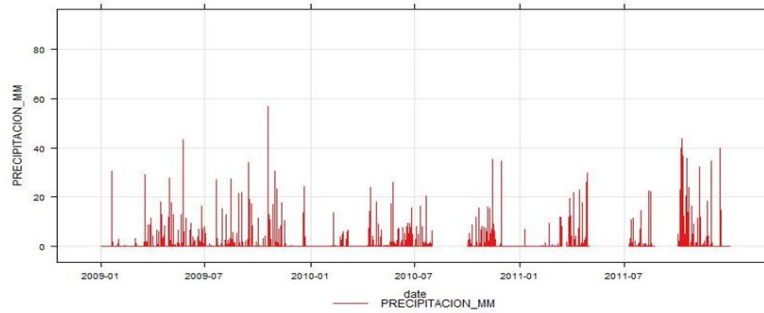


Figura 85 Precipitación horaria estación Cerrolargo [mm]

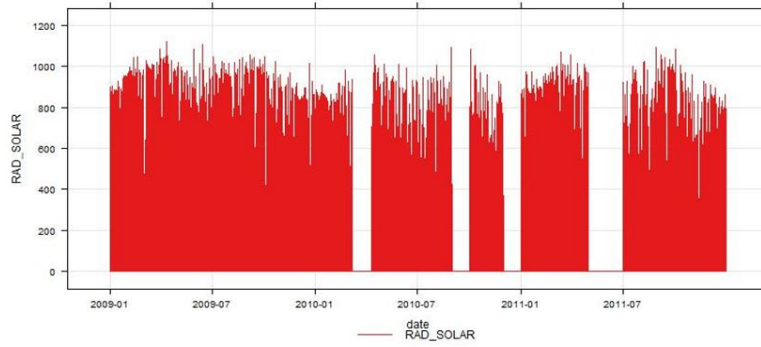


Figura 86 Radiación solar global horaria estación Cerrolargo [w/m²]

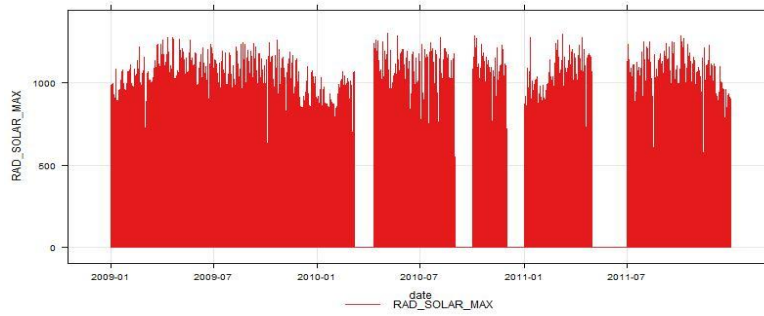


Figura 87 Radiación solar máxima horaria estación Cerrolargo [w/m²]

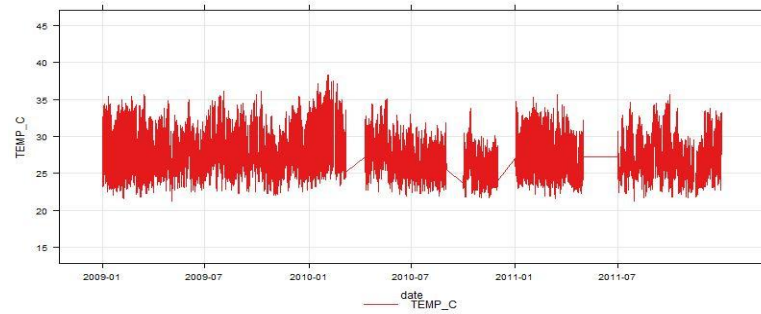


Figura 88 Temperatura promedio horaria estación Cerrolargo [°C]

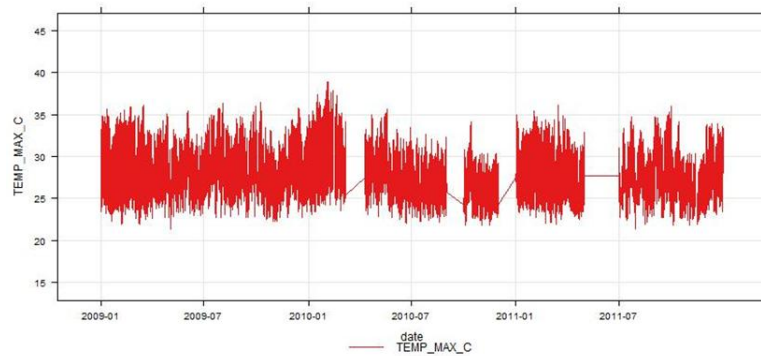


Figura 89 Temperatura máxima horaria estación Cerrolargo [°C]

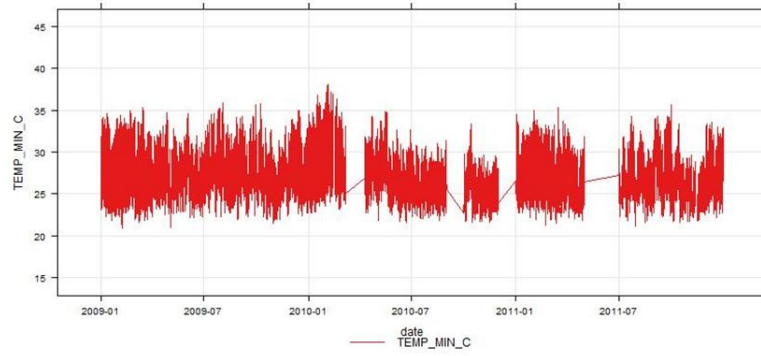


Figura -90 Temperatura mínima horaria estación Cerrolargo [°C]

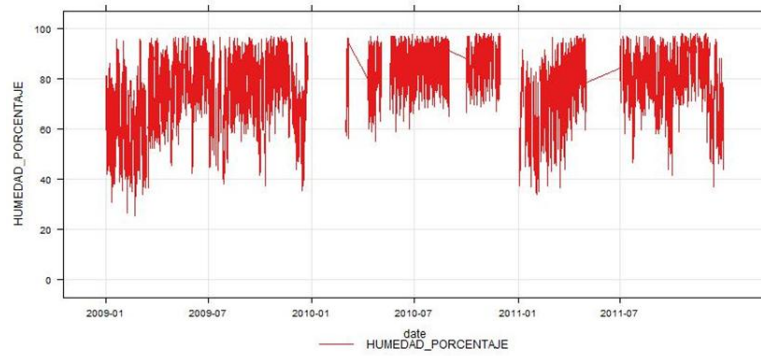


Figura 91 Humedad relativa horaria estación Cerrolargo [%]

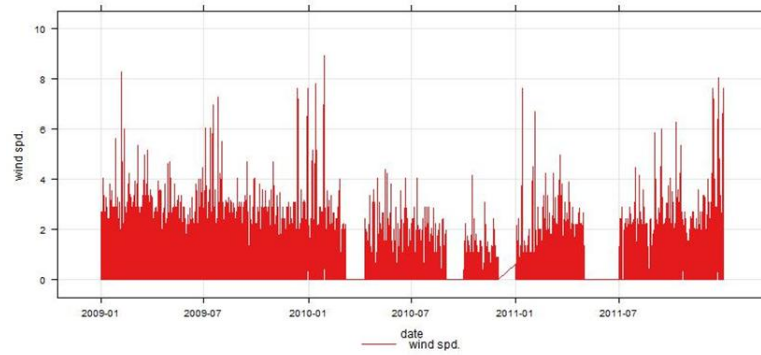


Figura 92 Velocidad del viento horaria estación Cerrolargo [m/s]

A.2.2 Comportamiento horario de variables meteorológicas (diagramas de cajas)

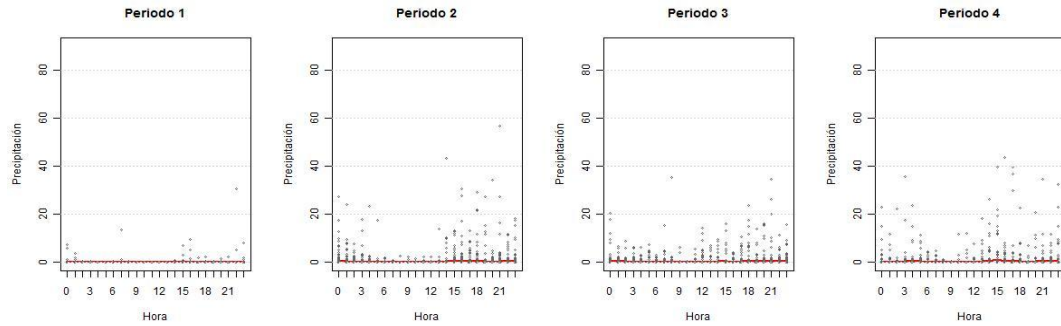


Figura 93 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Cerrolargo [mm]

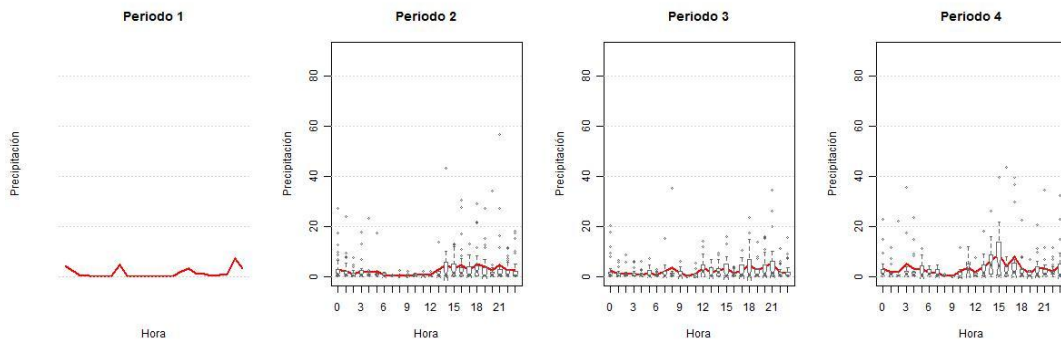


Figura 94 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Cerrolargo (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]

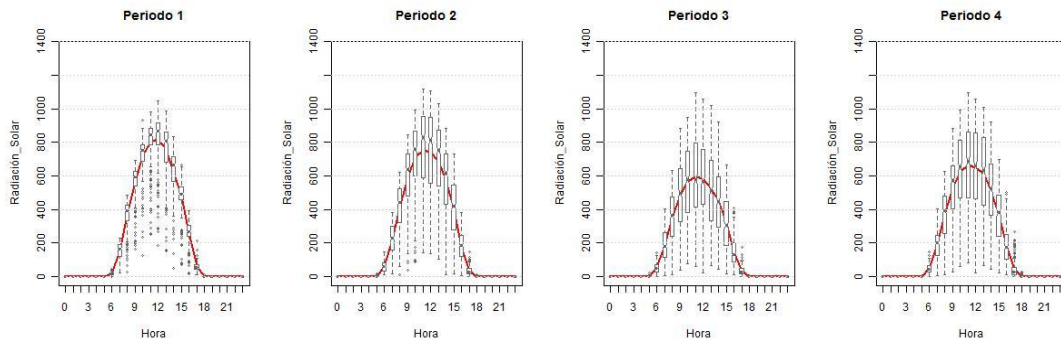


Figura 95 Diagrama de cajas radiación solar global estación Cerrolargo [w/m^2]

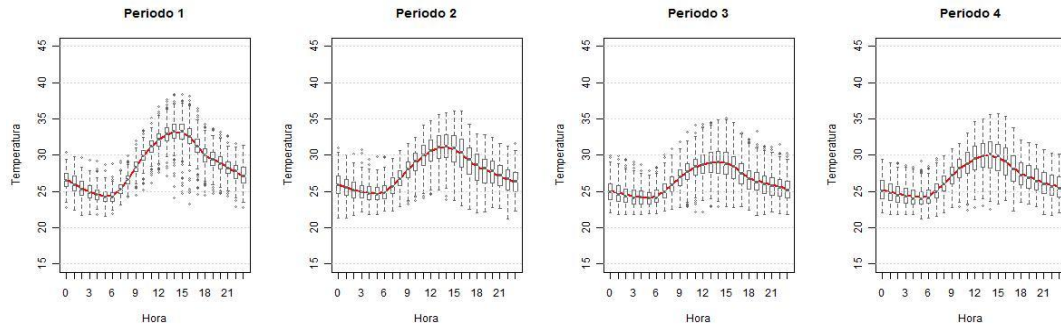


Figura 96 Diagrama de cajas temperatura estación Cerrolargo [°C]

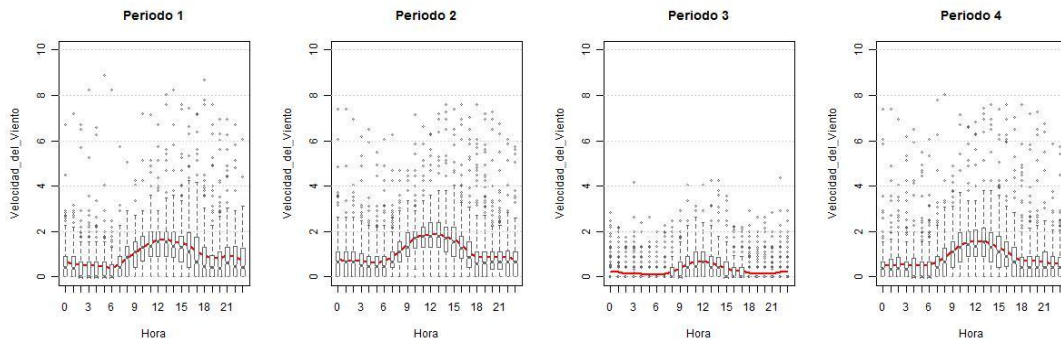


Figura 97 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Cerrolargo [m/s]

A.2.3 Comportamiento del viento

A.2.3.1 Rosas de viento por periodo

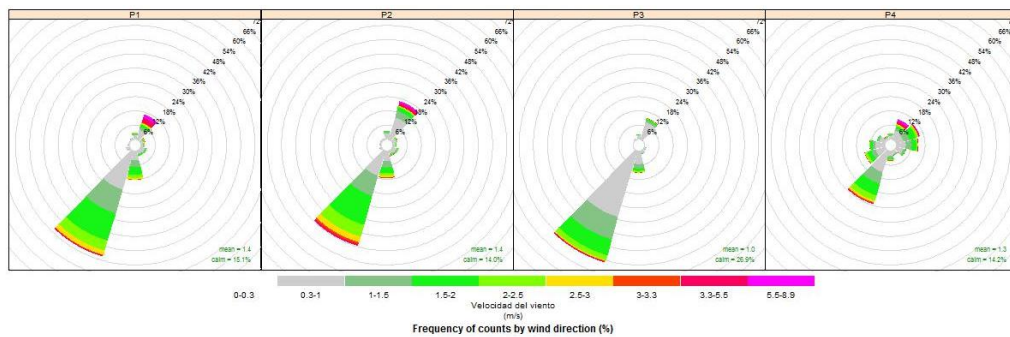


Figura 98 Rosa de vientos total por periodo estación Cerrolargo

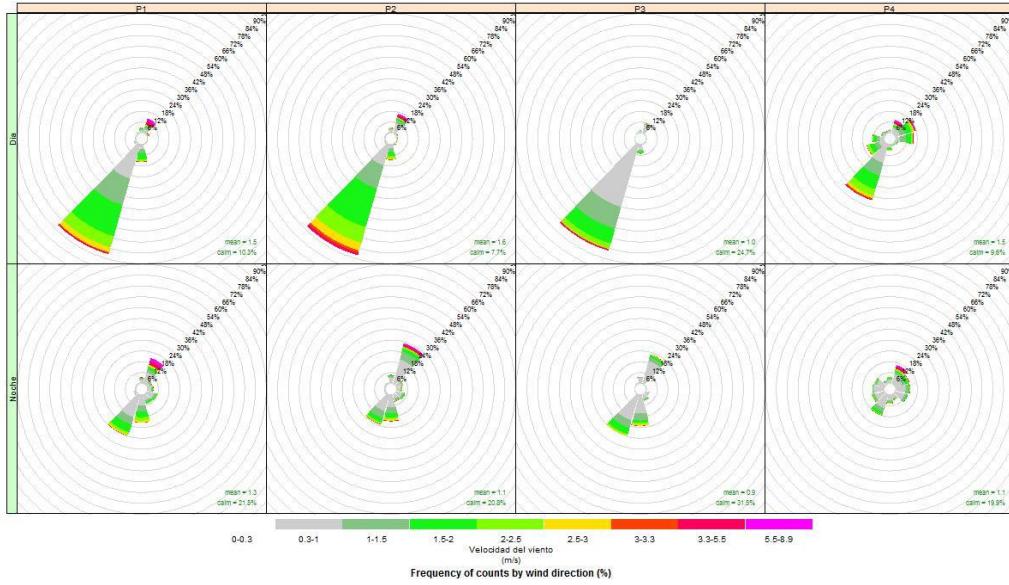


Figura 99 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Cerrolargo

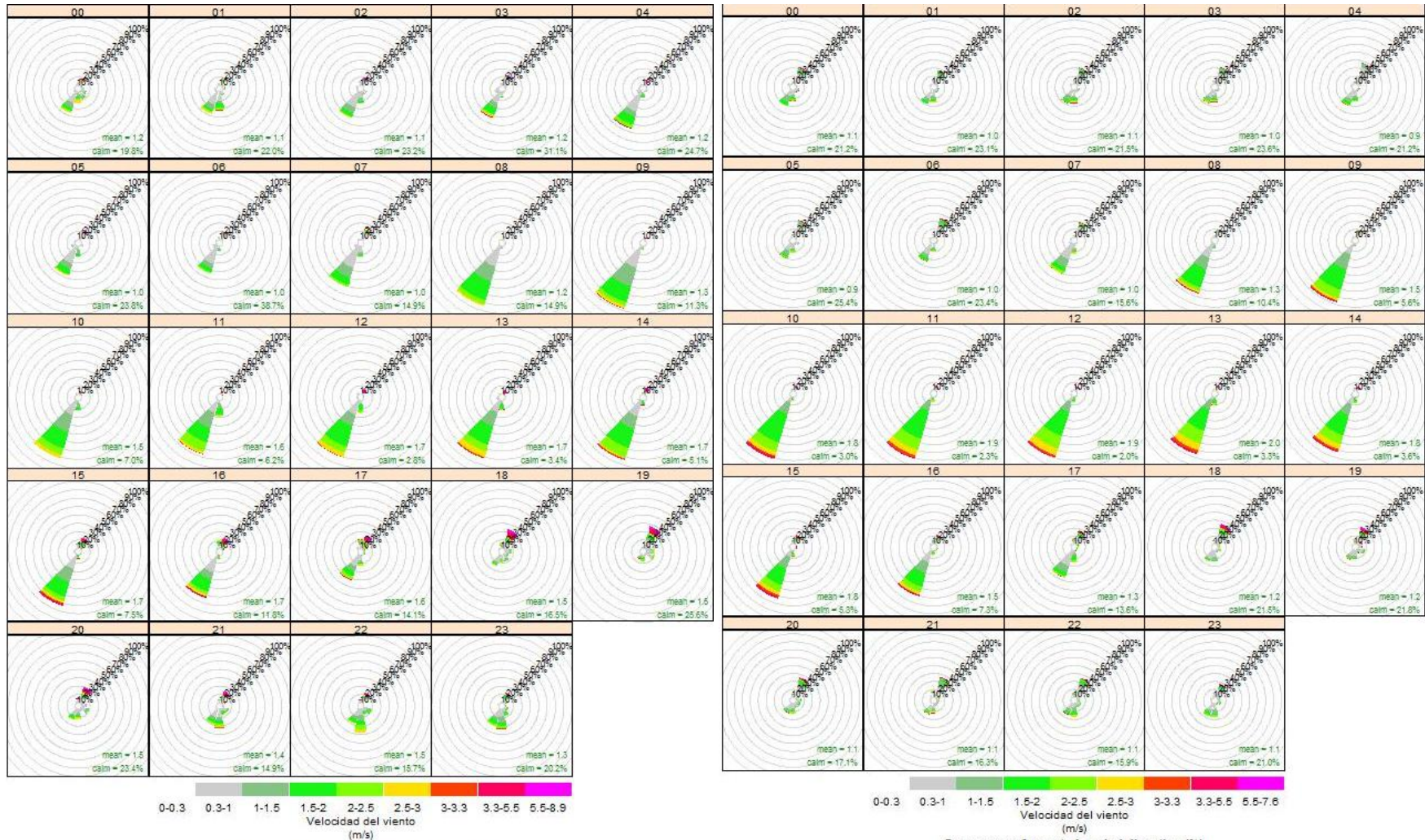


Figura 100 Rosas de viento por horas periodo 1 estación Cerrolargo

Figura 101 Rosas de viento por horas periodo 2 estación Cerrolargo

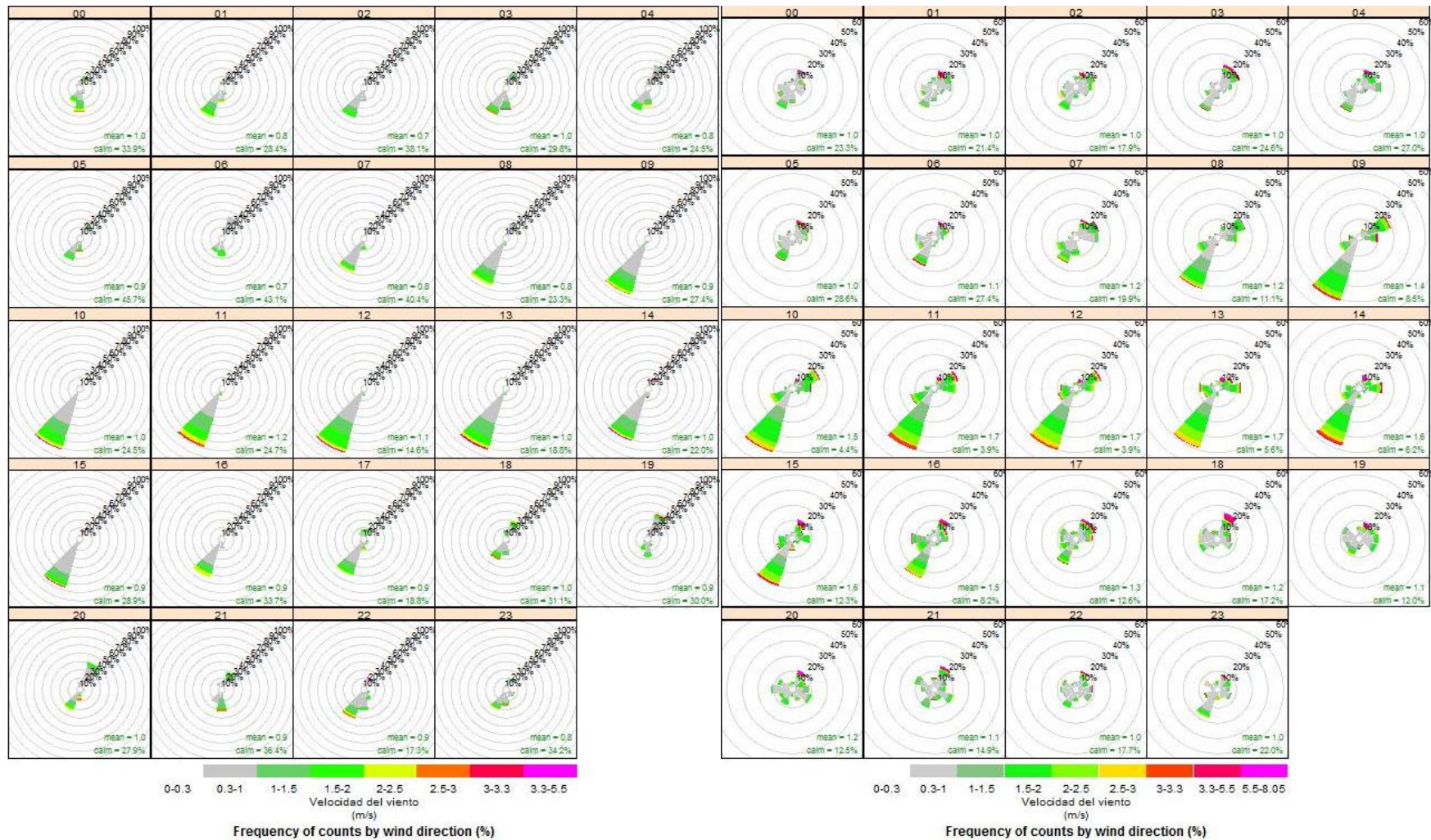


Figura 102 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Cerrolargo

Figura 103 Rosas de viento periodo 4 estación Cerrolargo

A.2.3.1 Rosas de frecuencia por periodo

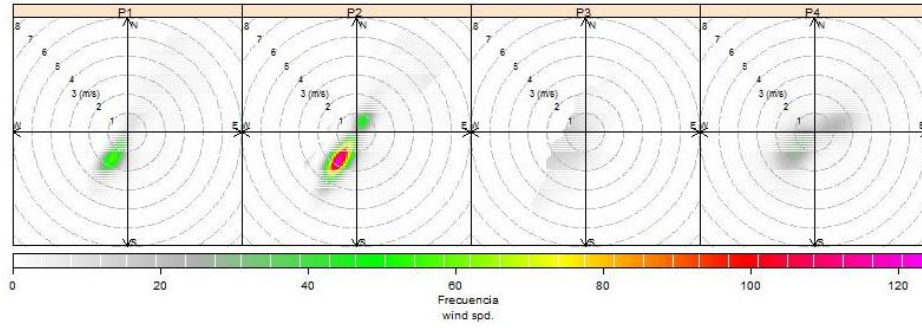


Figura 104 Rosa de frecuencia total por periodos estación Cerrolargo

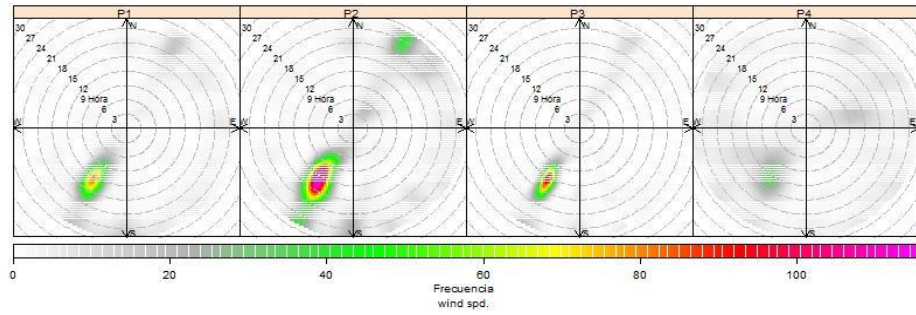


Figura 105 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Cerrolargo

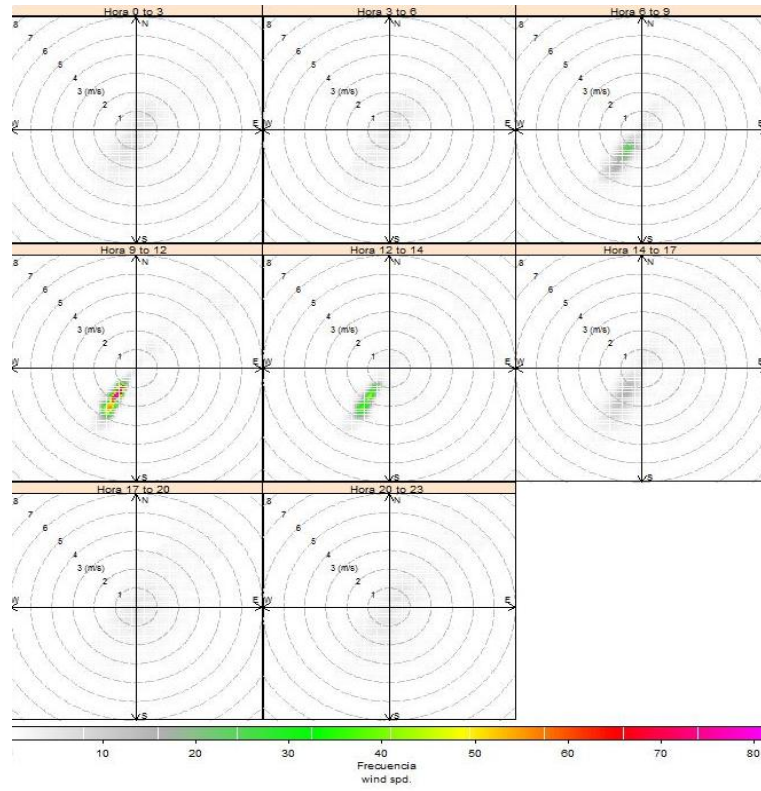


Figura 106 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Cerrolargo

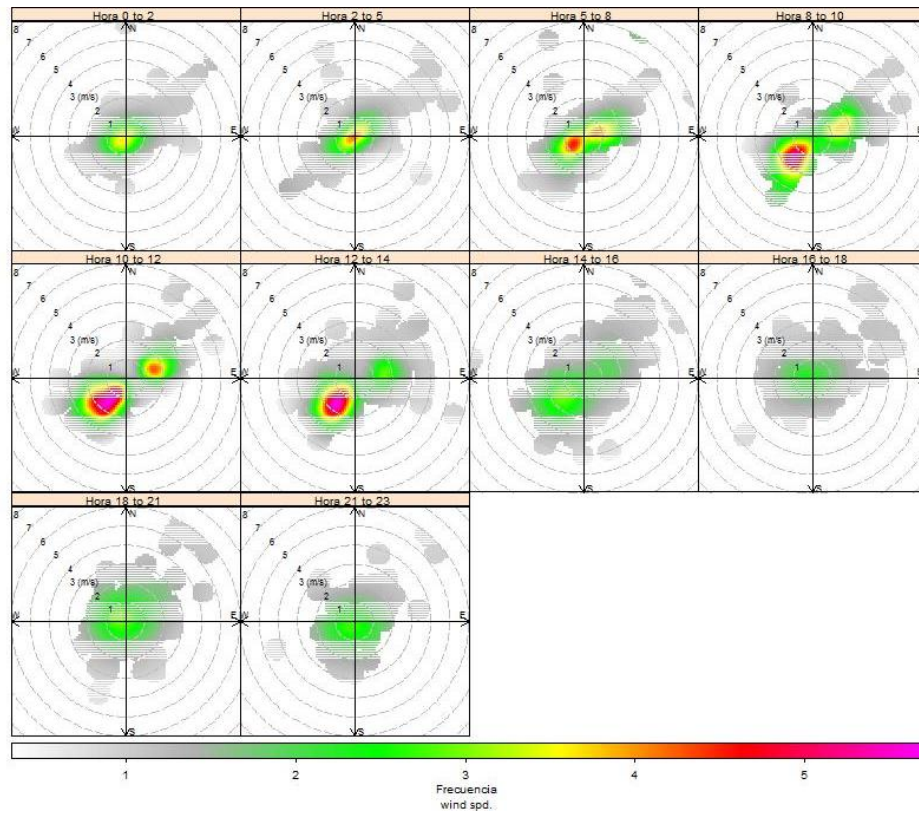


Figura 107 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Cerrolargo

A3 Estación Descanso

A.3.1 Series de tiempo

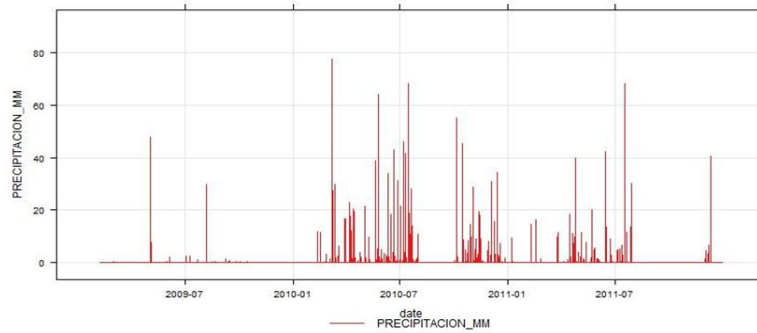


Figura 108 Precipitación horaria estación Descanso [mm]

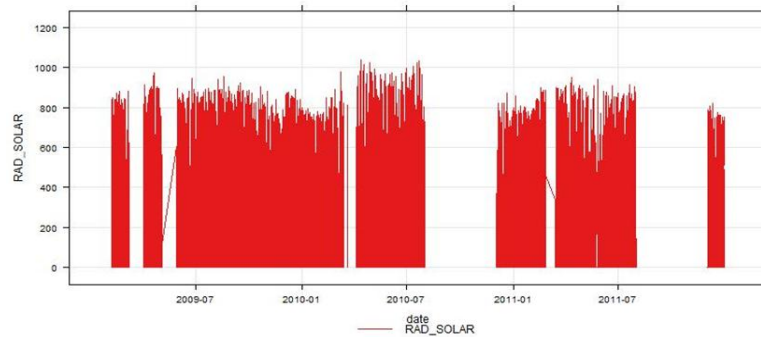


Figura 109 Radiación solar global horaria estación Descanso [w/m^2]

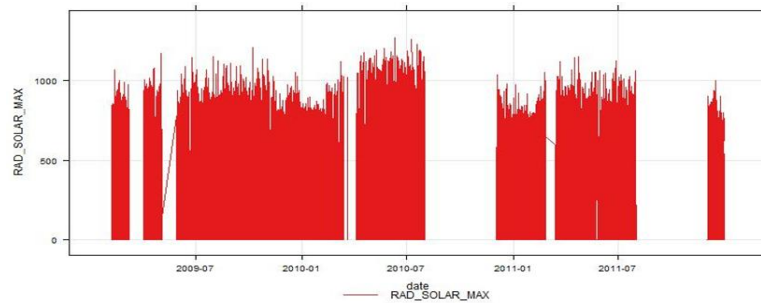


Figura 110 Radiación solar máxima horaria estación Descanso [w/m^2]

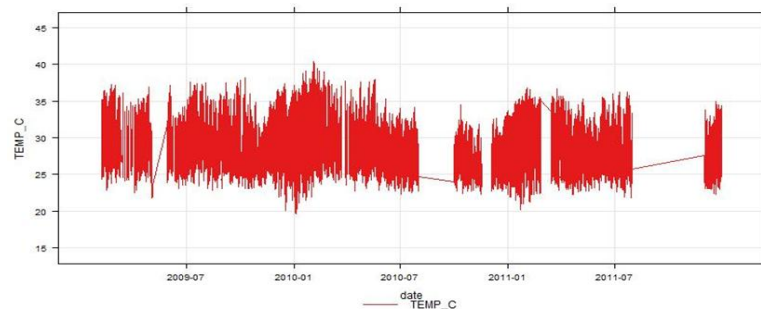


Figura 111 Temperatura promedio horaria estación Descanso [°C]

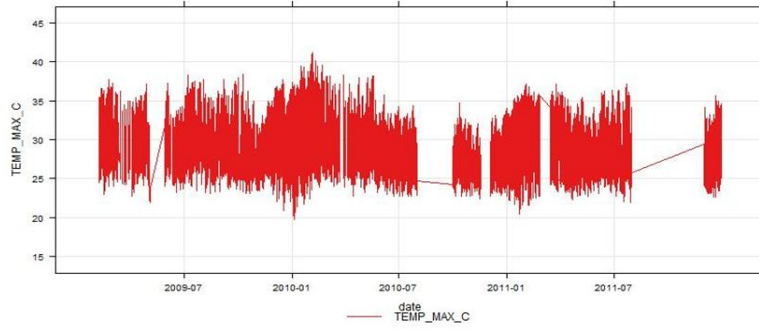


Figura 112 Temperatura máxima horaria estación Descanso [°C]

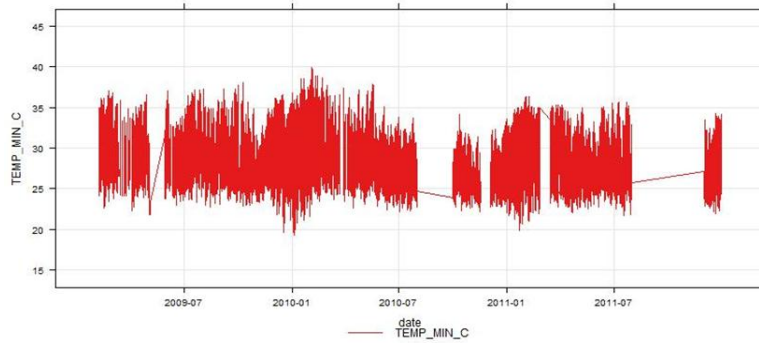


Figura 113 Temperatura mínima horaria estación Descanso [°C]

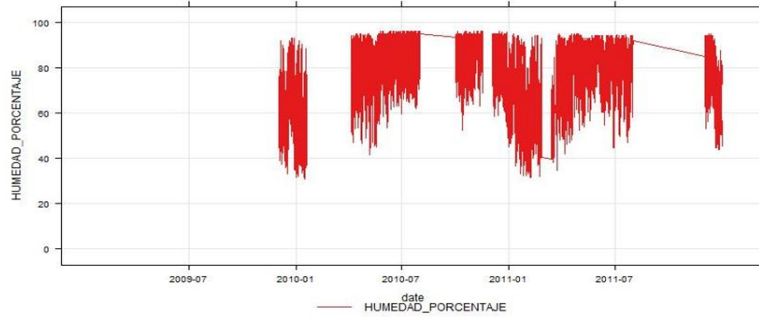


Figura 114 Humedad relativa horaria estación Descanso [%]

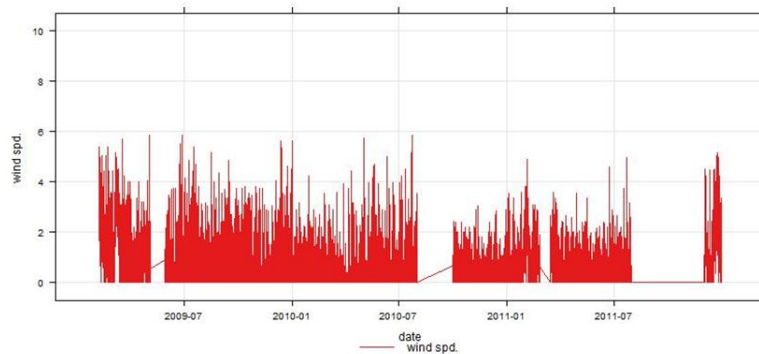


Figura 115 Velocidad del viento horaria estación Descanso [m/s]

A.3.2 Comportamiento horario de variables meteorológicas (diagramas de cajas)

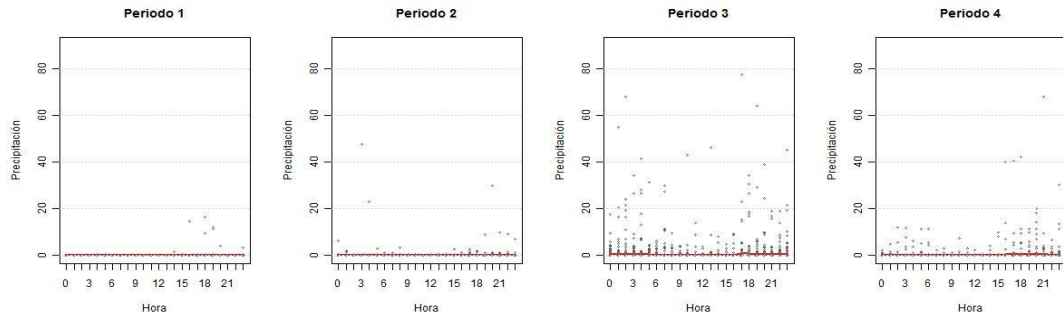


Figura 116 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Descanso [mm]

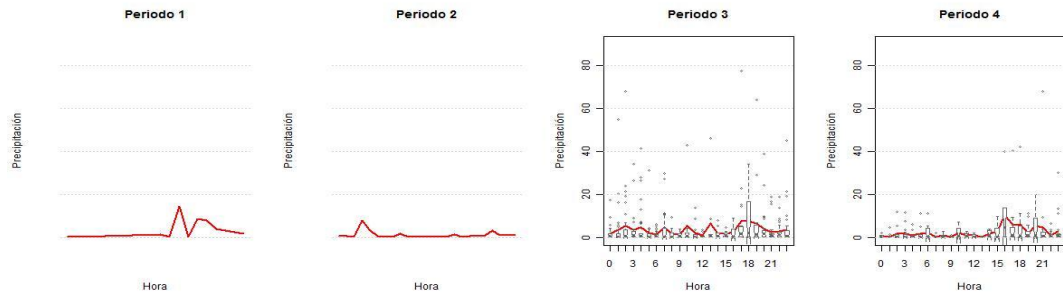


Figura 117 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Descanso (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]

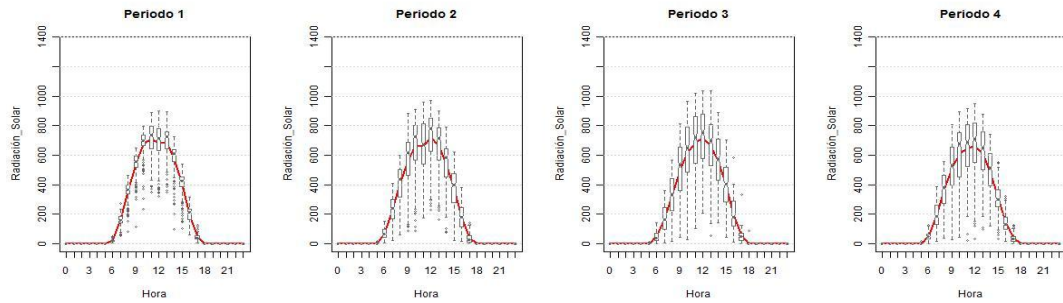


Figura 118 Diagrama de cajas radiación solar global estación Descanso [w/m²]

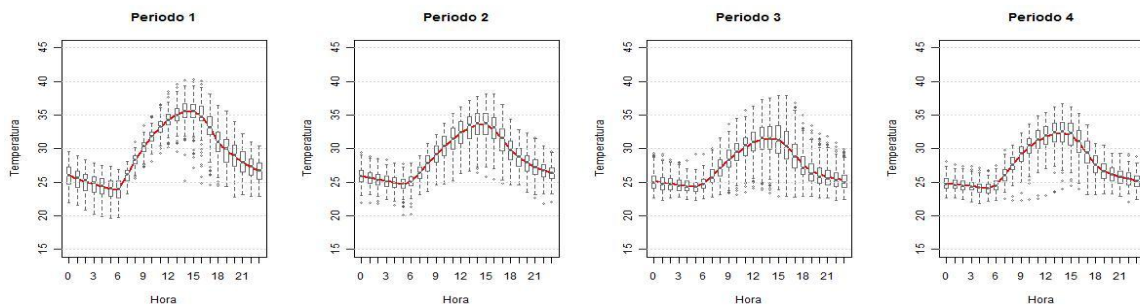


Figura 119 Diagrama de cajas temperatura estación Descanso [°C]

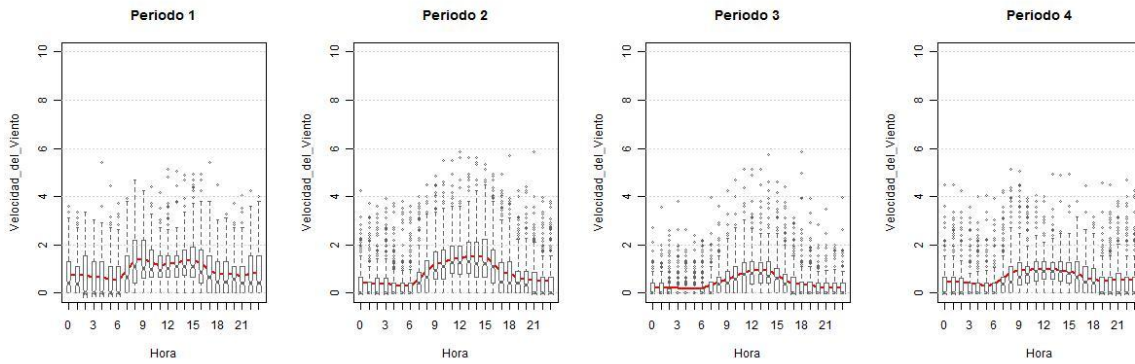


Figura 120 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Descanso [m/s]

A.3.3 Comportamiento del viento

A.3.3.1 Rosas de viento por periodo

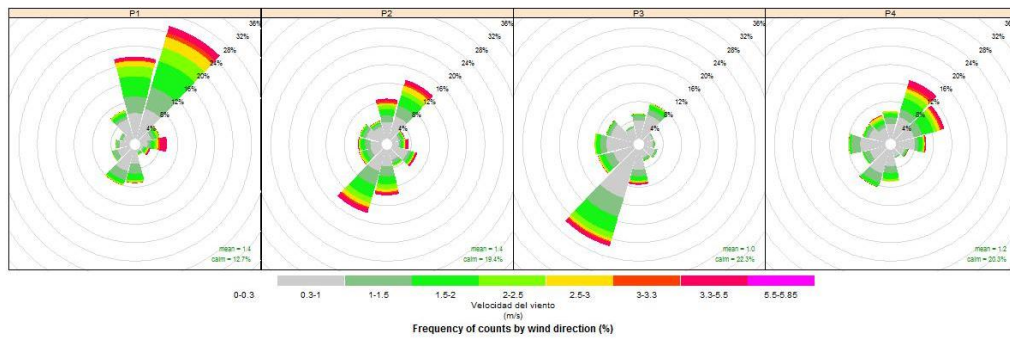


Figura 121 Rosa de vientos total por periodo estación Descanso

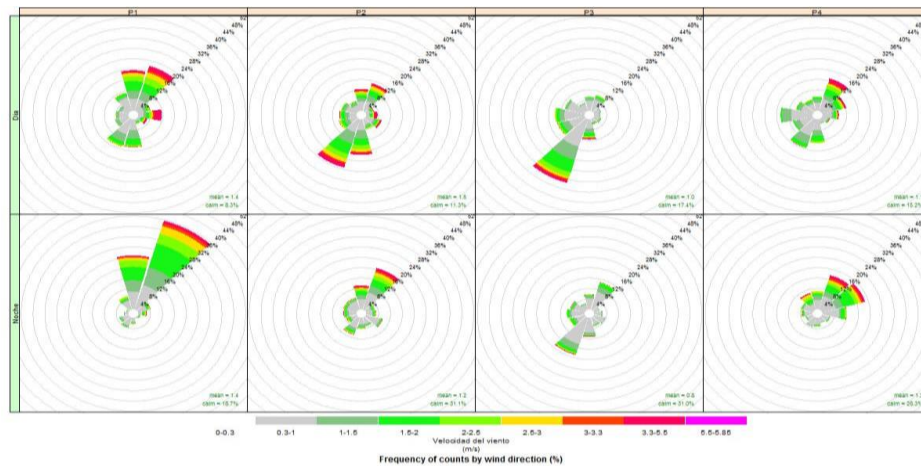
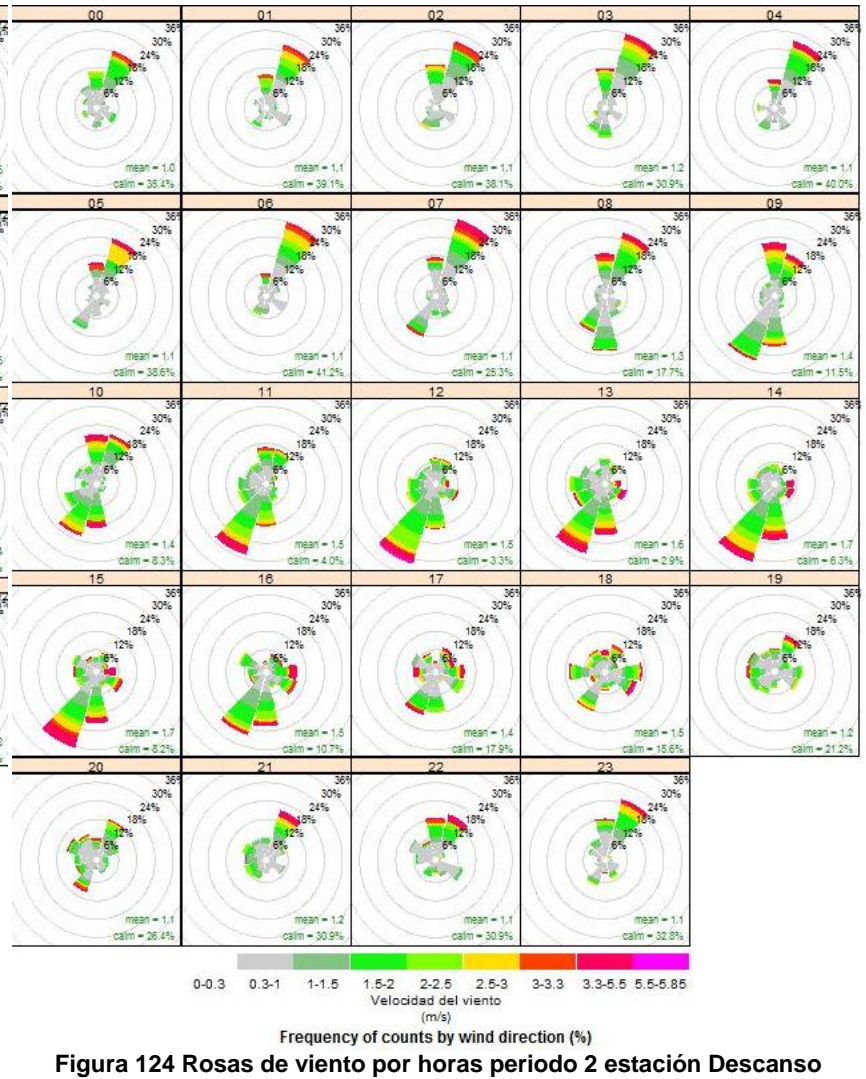


Figura 122 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Descanso



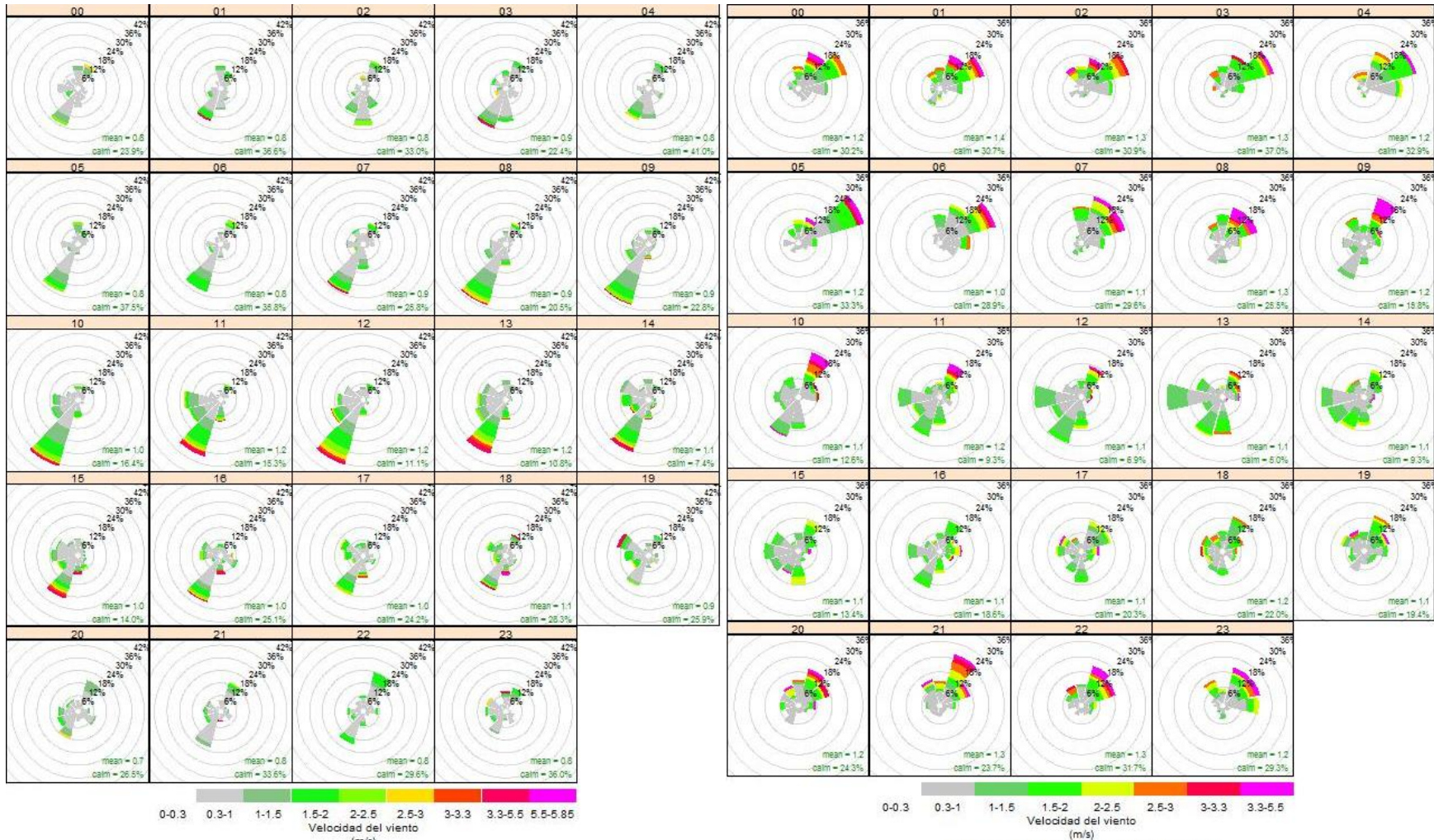


Figura 125 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Descanso

Figura 126 Rosas de viento periodo 4 estación Descanso

A.3.3.2 Rosas de frecuencia por periodo

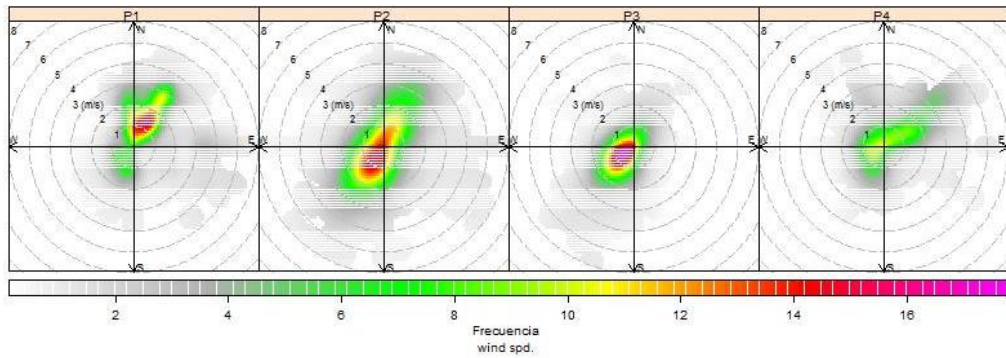


Figura 127 Rosa de frecuencia total por periodos estación Descanso

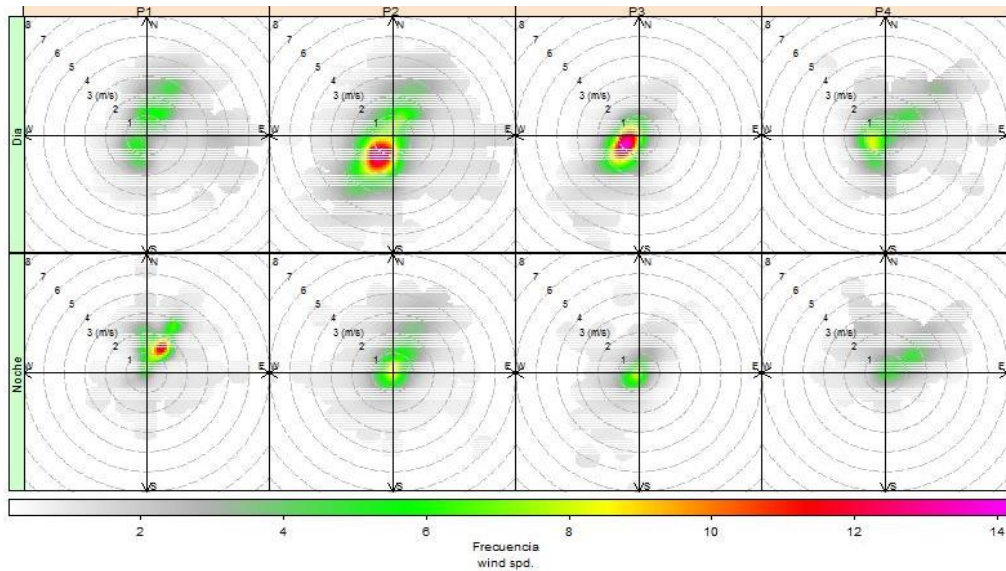


Figura 128 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo estación Descanso

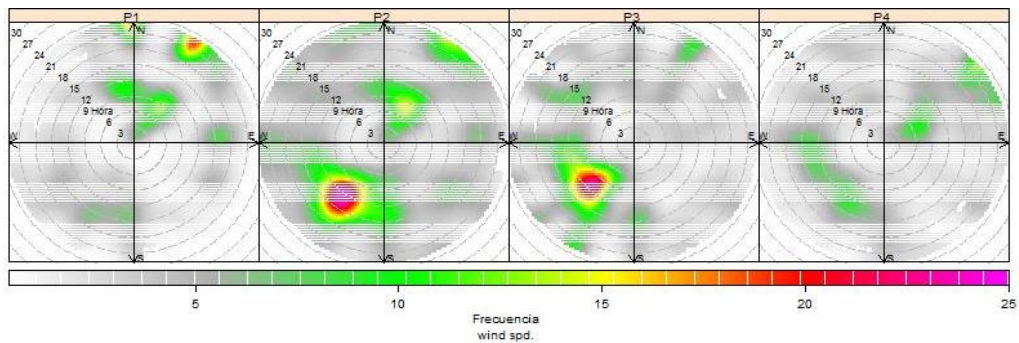


Figura 129 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Descanso

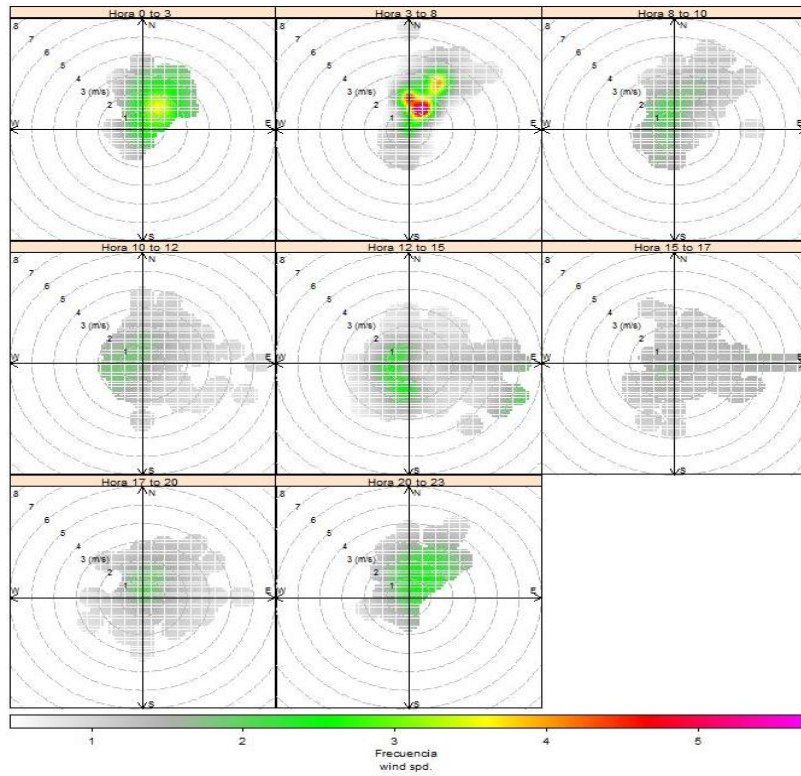


Figura 130 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Descanso

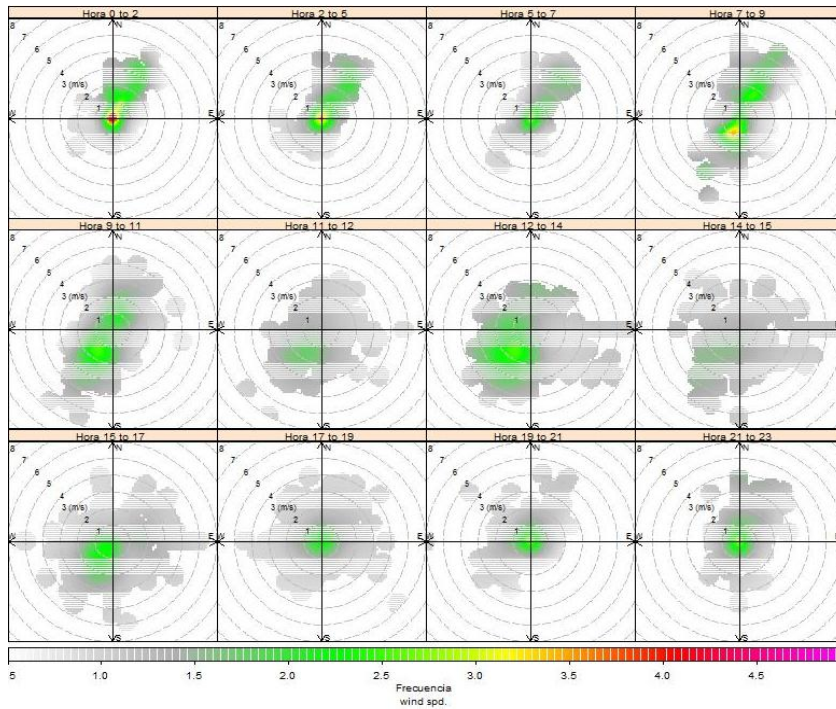


Figura -131 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Descanso

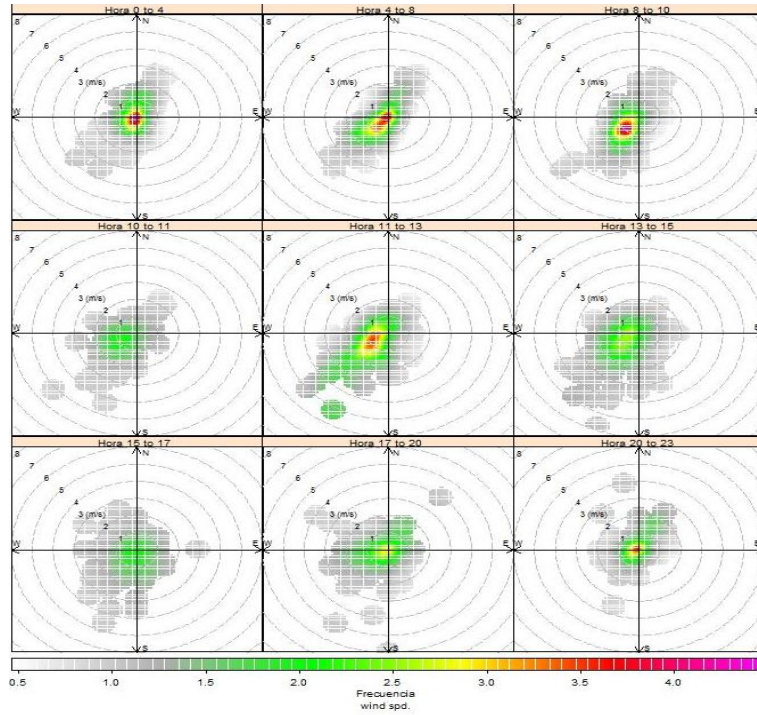


Figura 132 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación Descanso

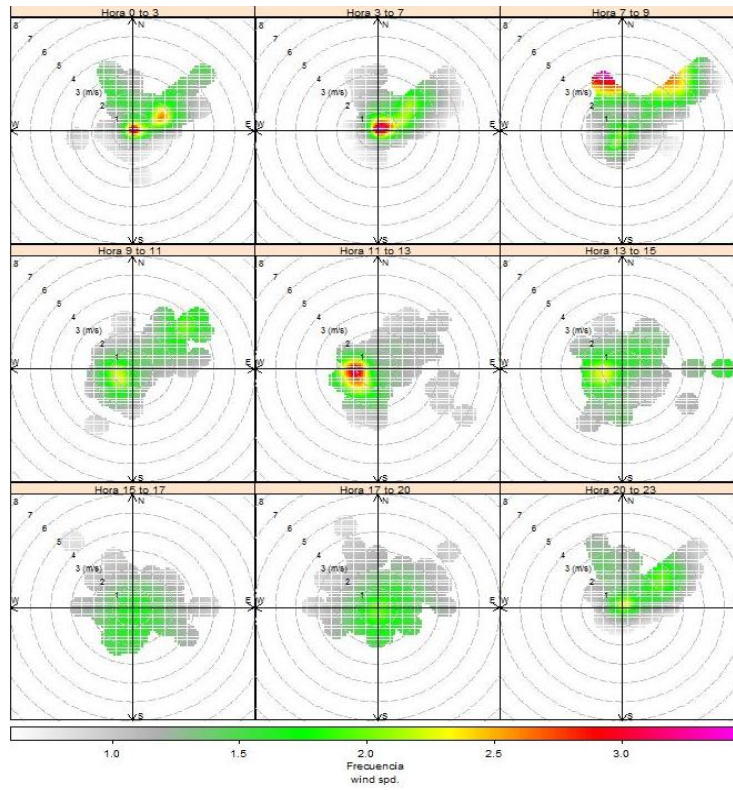


Figura -133 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Descanso

A4 Estación Calenturitas

A.4.1 Series de tiempo

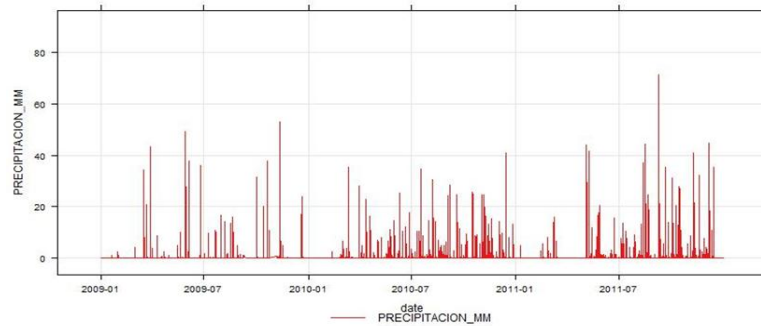


Figura -134 Precipitación horaria estación Calenturitas [mm]

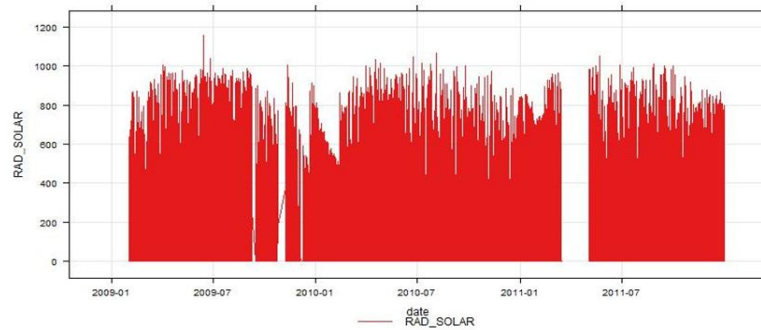


Figura 135 Radiación solar global horaria estación Calenturitas [w/m^2]

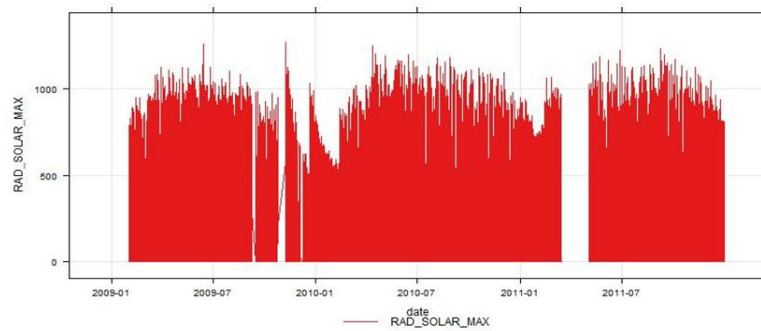


Figura 136 Radiación solar máxima horaria estación Calenturitas [w/m^2]

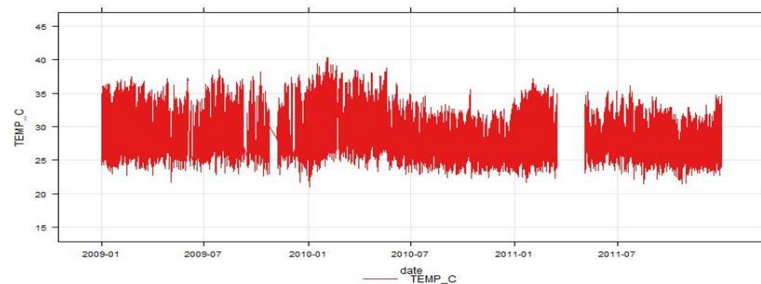


Figura 137 Temperatura promedio horaria estación Calenturitas [°C]

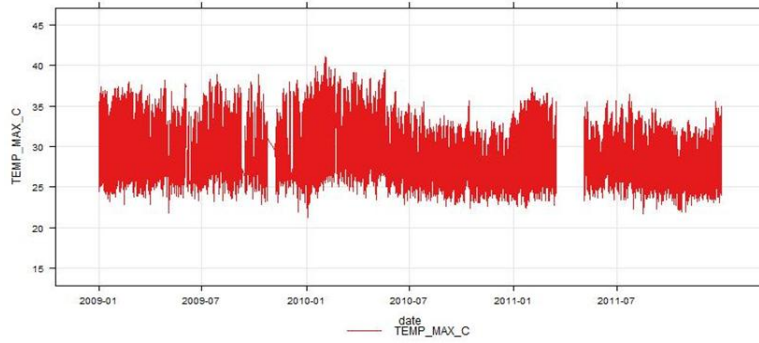


Figura 138 Temperatura máxima horaria estación Calenturitas [°C]

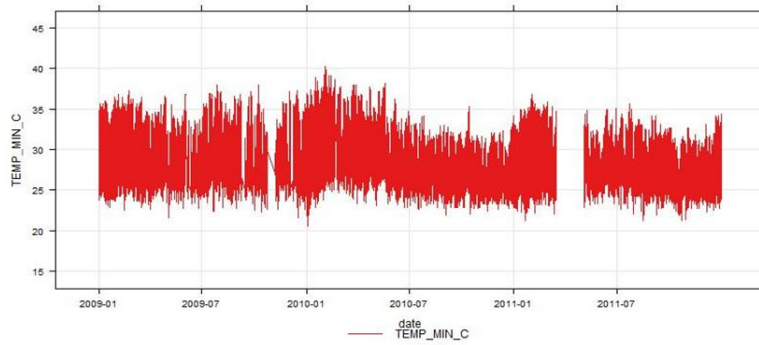


Figura 139 Temperatura mínima horaria estación Calenturitas [°C]

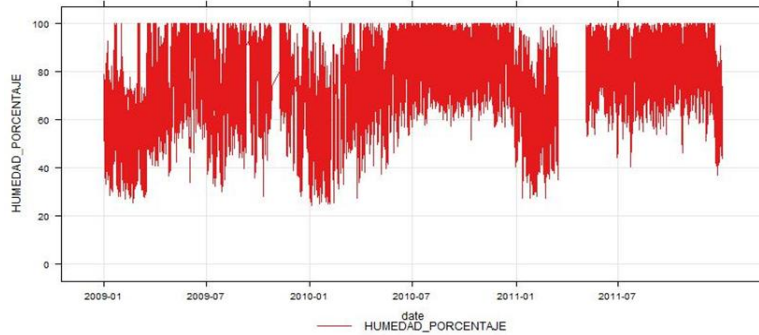


Figura 140 Humedad relativa horaria estación Calenturitas [%]

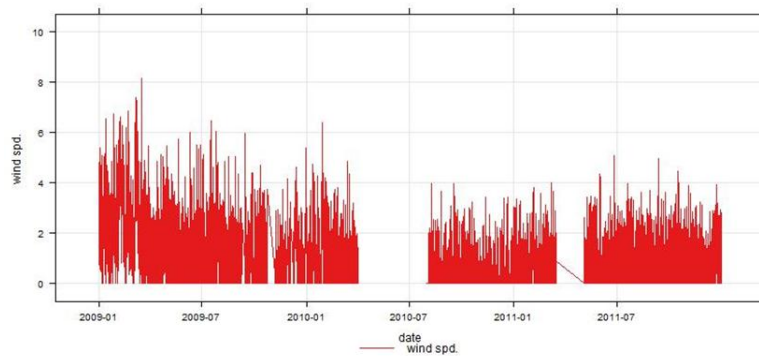


Figura 141 Velocidad del viento horaria estación Calenturitas [m/s]

A.4.2 Comportamiento horario de variables meteorológicas (diagramas de cajas)

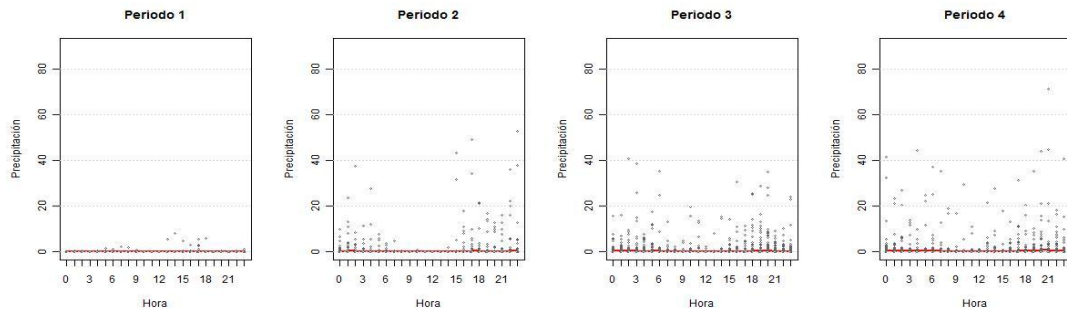


Figura 142 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Calenturitas [mm]

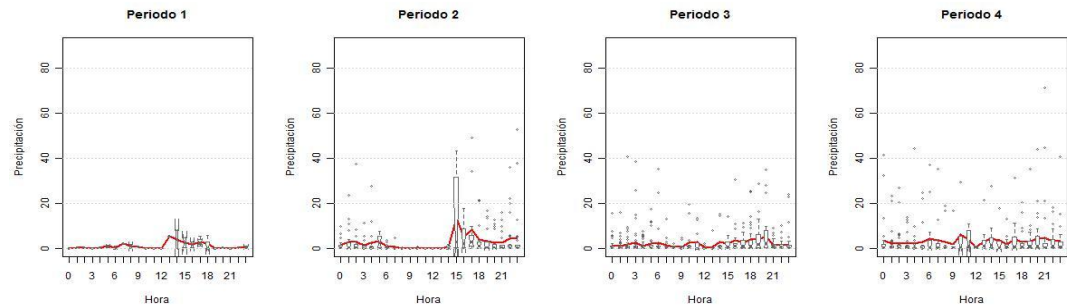


Figura -143 Diagrama de cajas precipitación horaria estación Calenturitas (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]

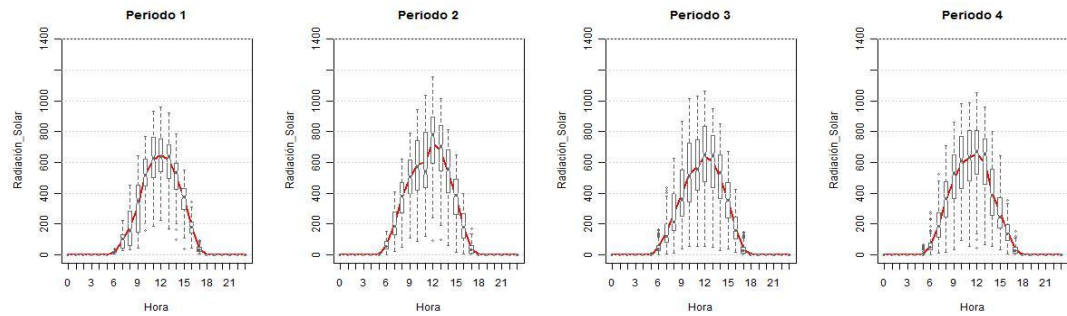


Figura -144 Diagrama de cajas radiación solar global estación Calenturitas [w/m²]

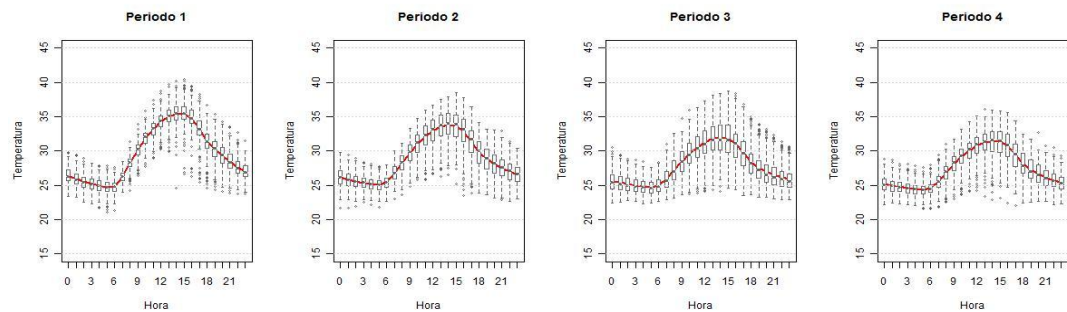


Figura 145 Diagrama de cajas temperatura estación Calenturitas [°C]

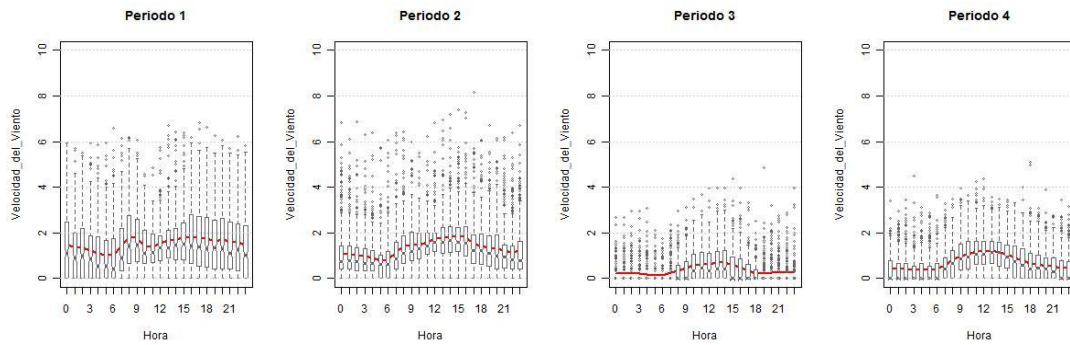


Figura 146 Diagrama de cajas velocidad del viento estación Calenturitas [m/s]

A.4.3 Comportamiento del viento

A.4.3.1 Rosas de viento por periodo

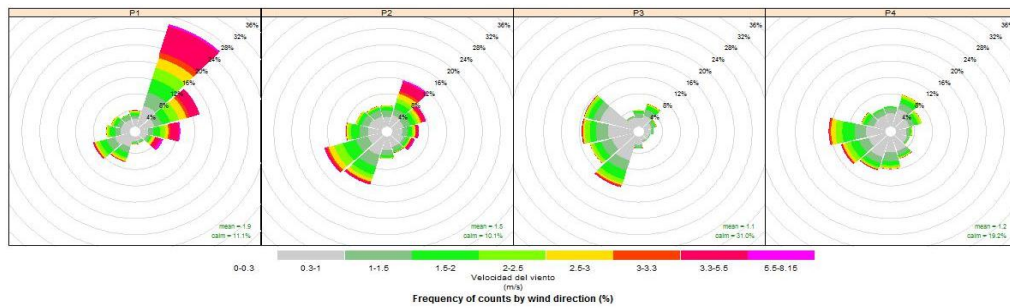


Figura -147 Rosa de vientos total por periodo estación Calenturitas

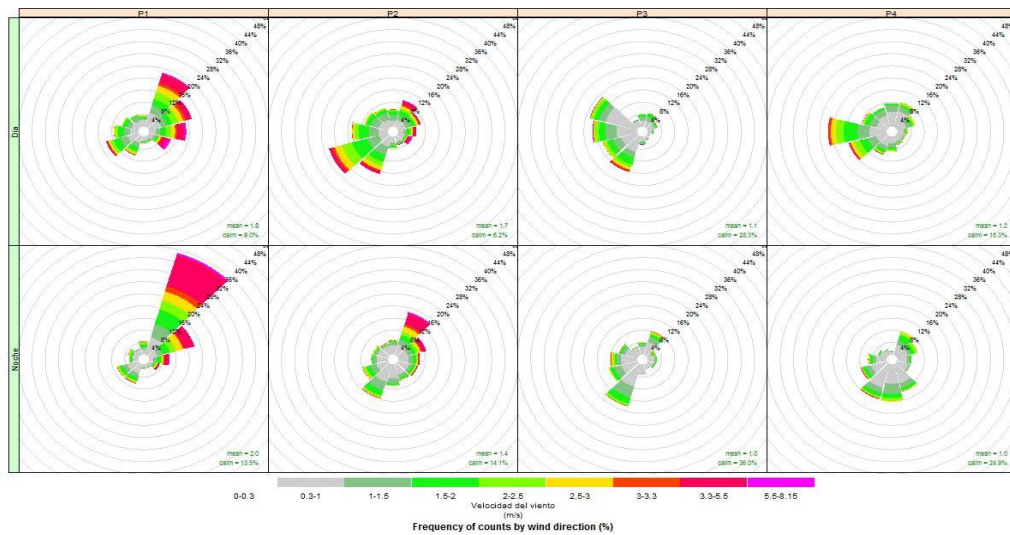


Figura 148 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación Calenturitas



Figura 149 Rosas de viento por horas periodo 1 estación Calenturitas

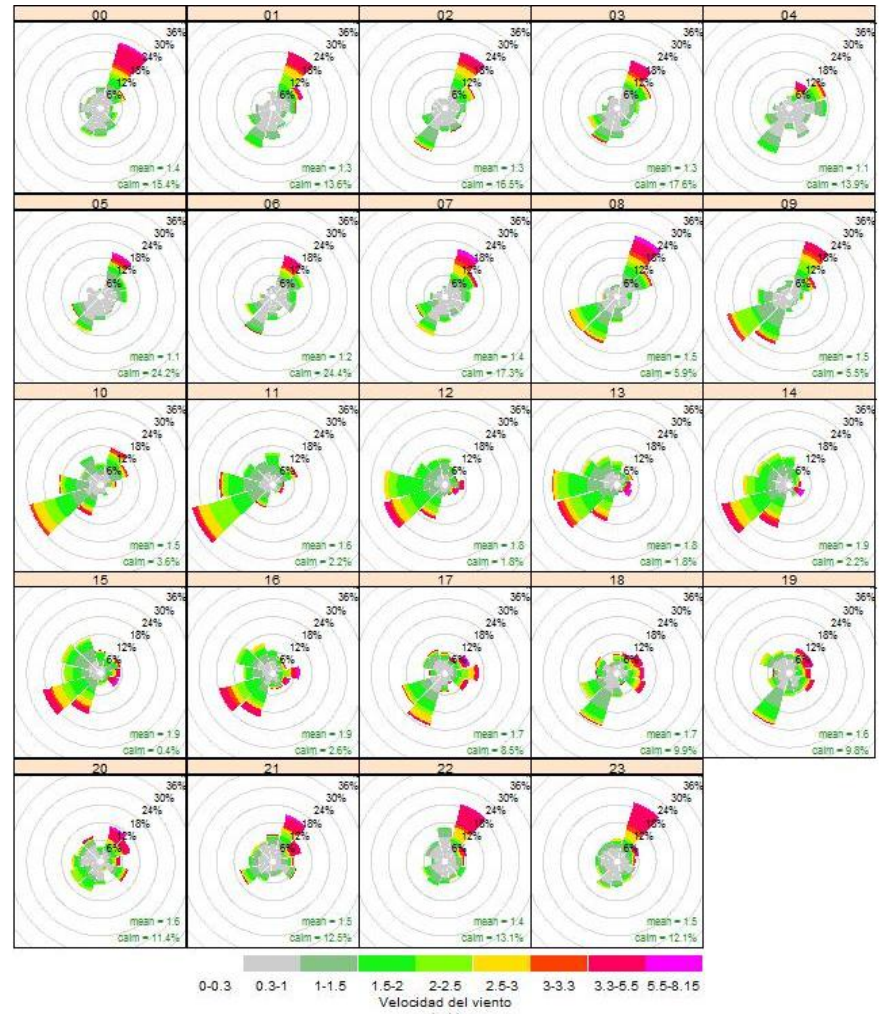


Figura 150 Rosas de viento por horas periodo 2 estación Calenturitas

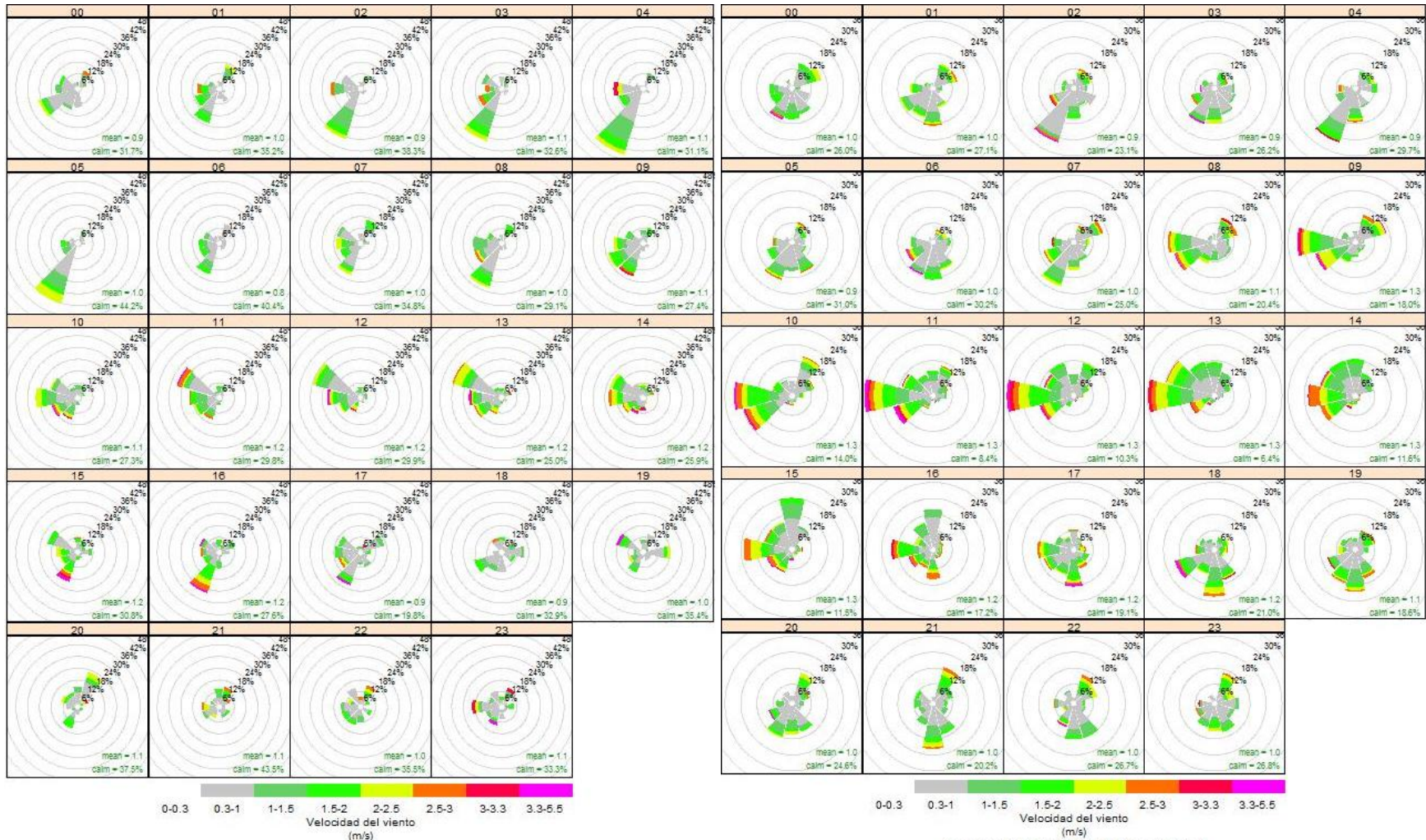


Figura 151 Rosas de viento por horas periodo 3 estación Calenturitas

Figura -152 Rosas de viento periodo 4 estación Calenturitas

A.4.3.2 Rosas de frecuencia por periodo

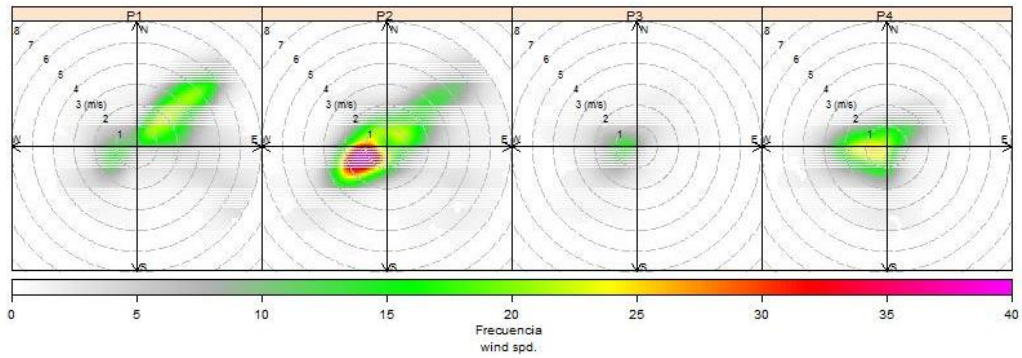


Figura 153 Rosa de frecuencia total por periodos estación Calenturitas

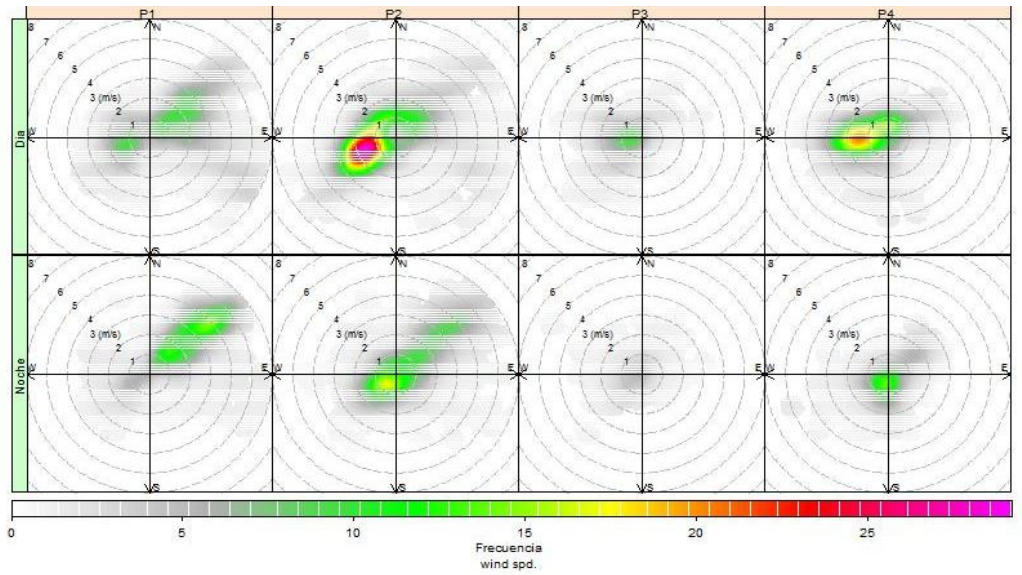


Figura 154 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo estación Calenturitas

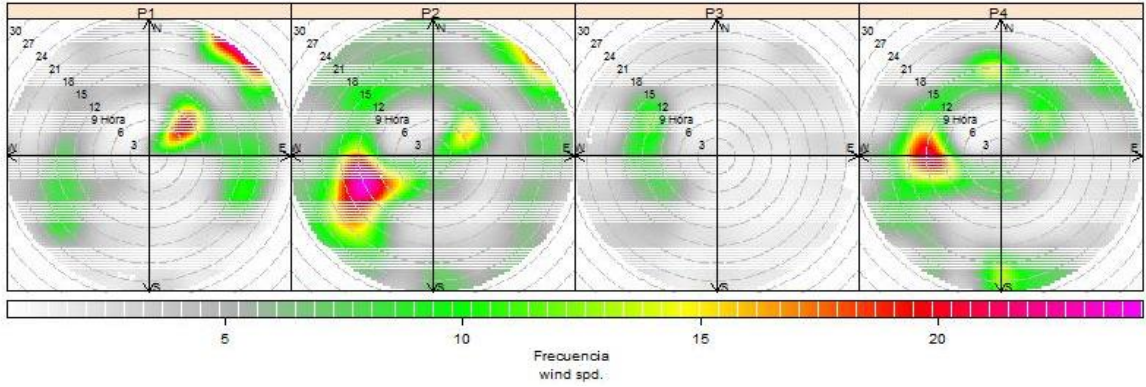


Figura -155 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación Calenturitas

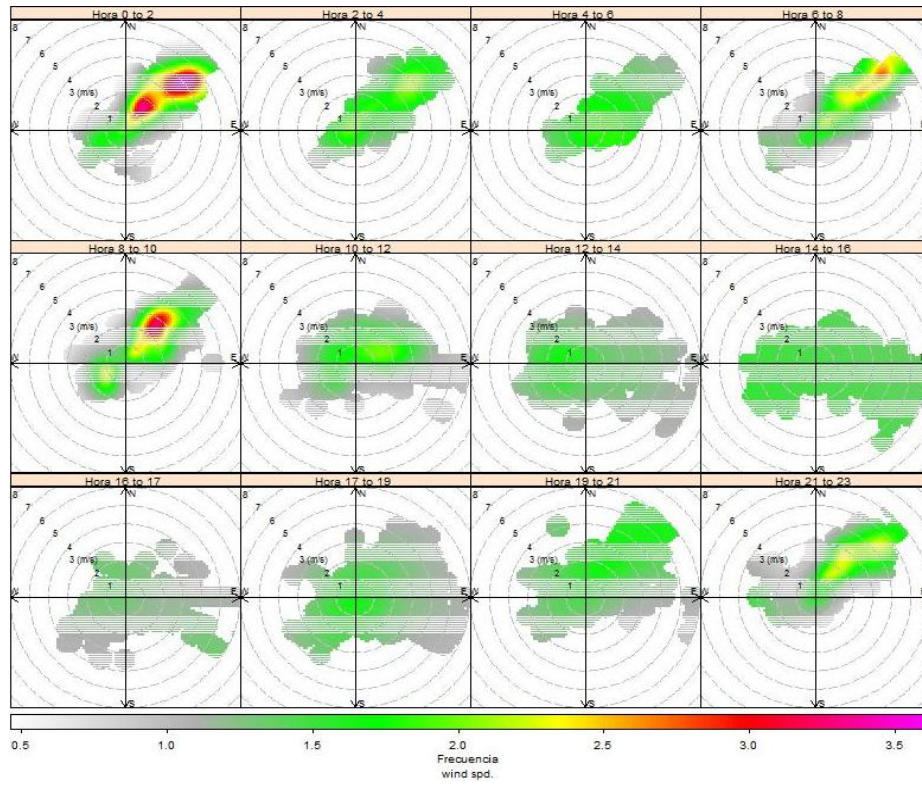


Figura 156 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación Calenturitas

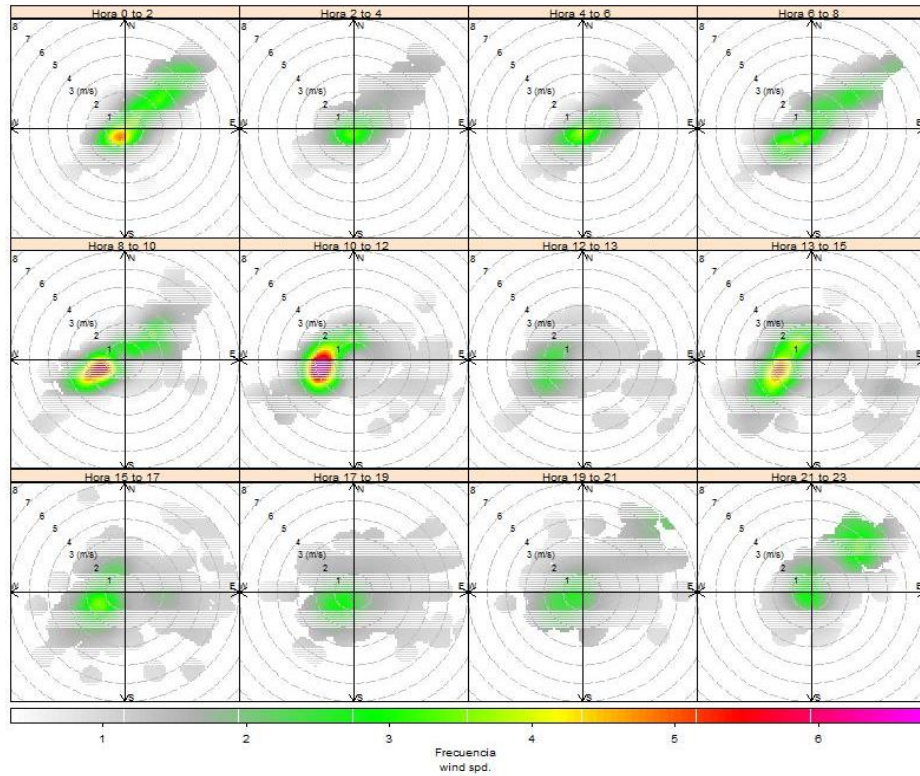


Figura -157 Rosa de frecuencia por horas periodo 2 estación Calenturitas

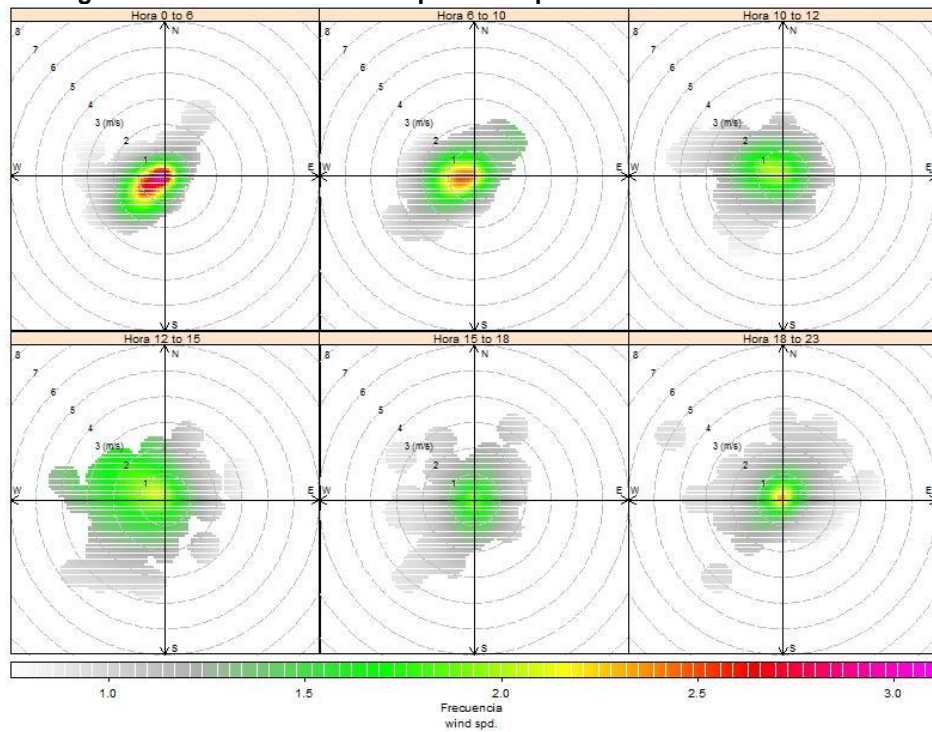


Figura 158 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación Calenturitas

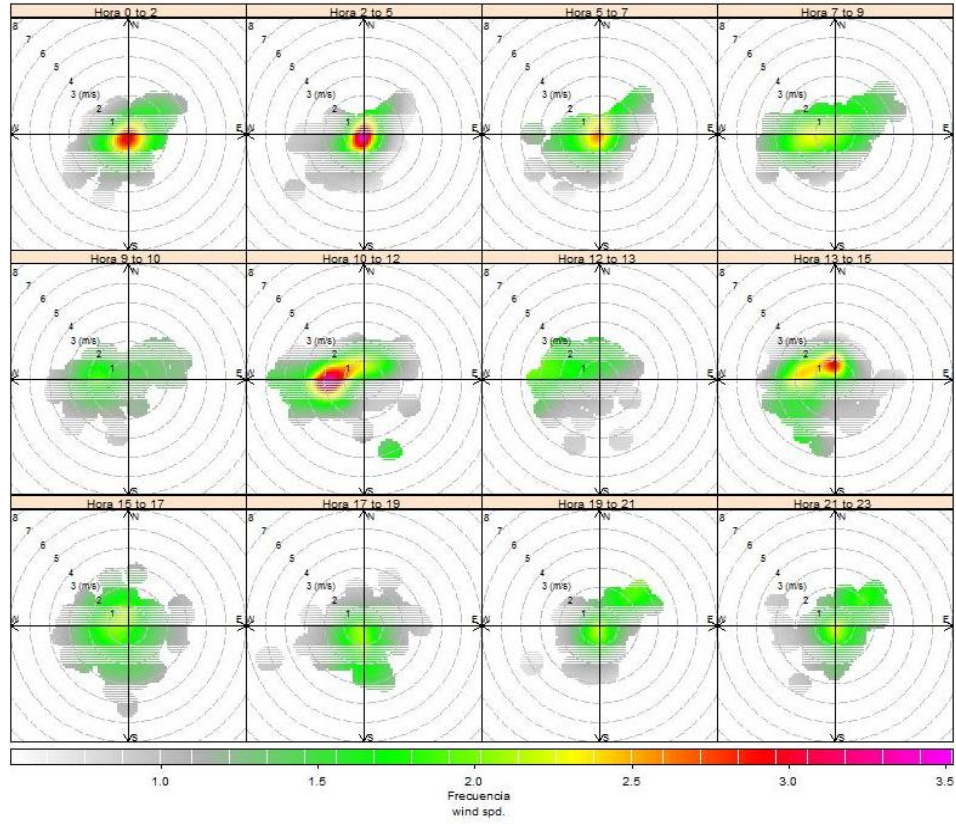


Figura -159 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación Calenturitas

A5 Estación La Francia IDEAM

A.5.1 Series de tiempo

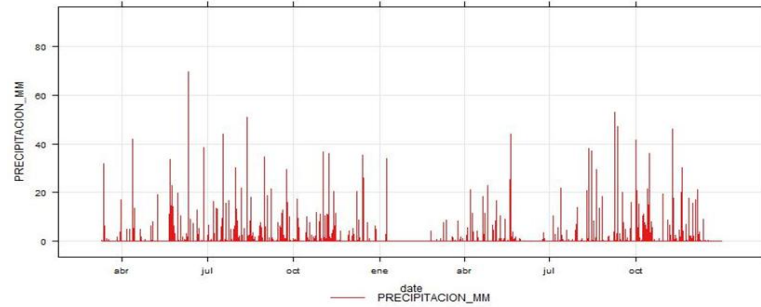


Figura 160 Precipitación horaria estación La Francia IDEAM [mm]

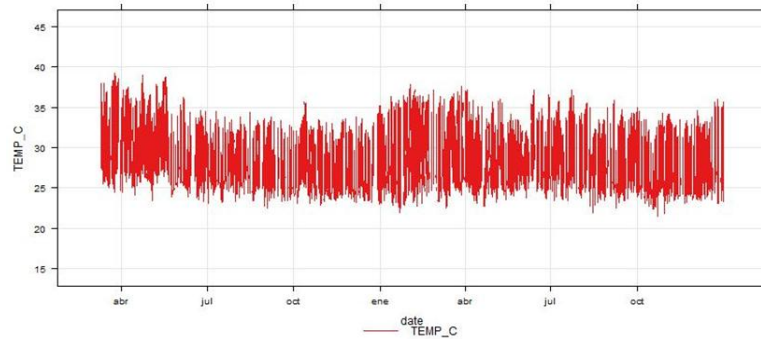


Figura 161 Temperatura promedio horaria estación La Francia IDEAM [°C]

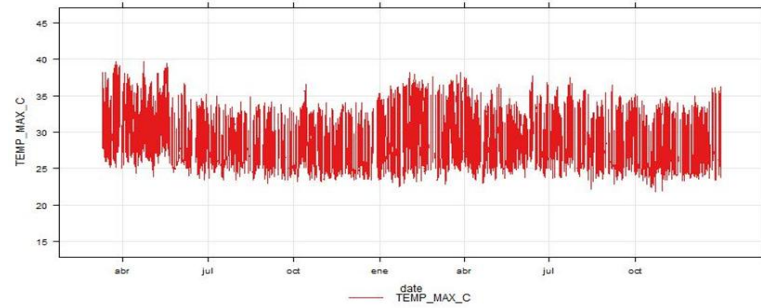


Figura 162 Temperatura máxima horaria estación La Francia IDEAM [°C]

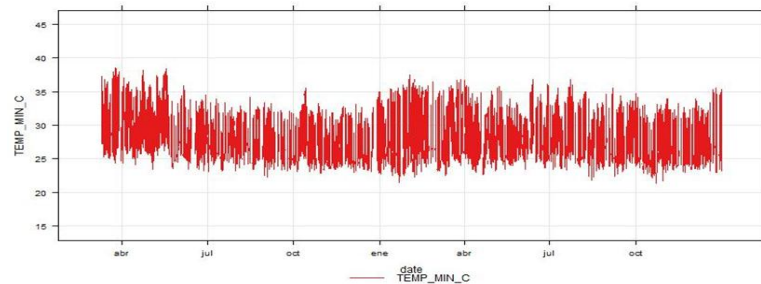


Figura 163 Temperatura mínima horaria estación La Francia IDEAM [°C]

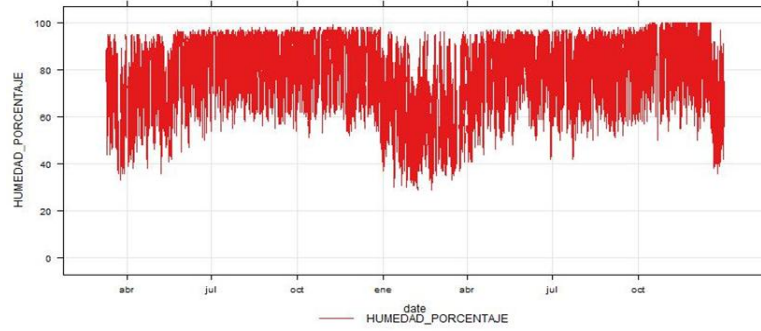


Figura 164 Humedad relativa horaria estación La Francia IDEAM [%]

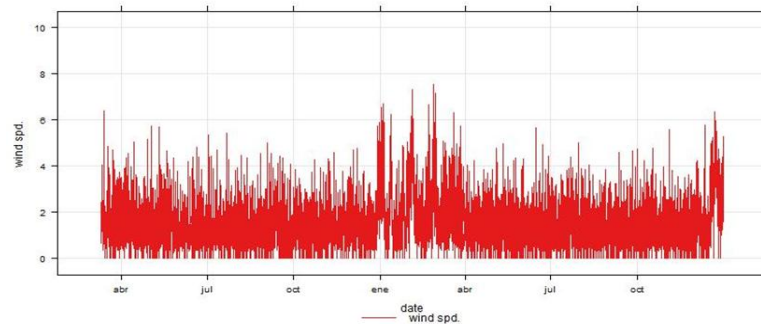


Figura 165 Velocidad del viento horaria estación La Francia IDEAM [m/s]

A.5.2 Comportamiento horario de variables meteorológicas (diagramas de cajas)

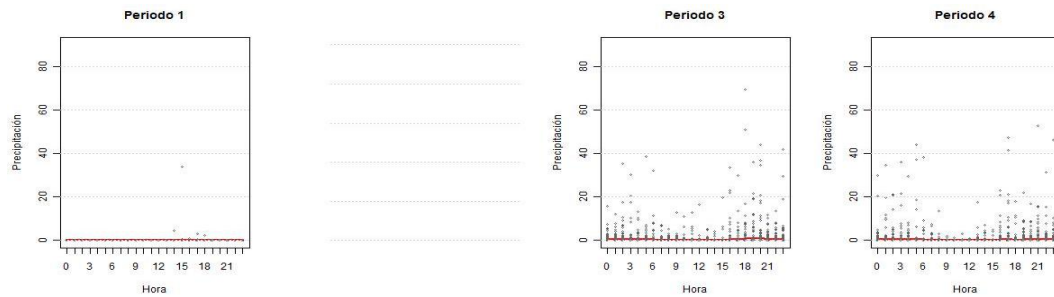


Figura 166 Diagrama de cajas precipitación horaria estación La Francia IDEAM [mm]

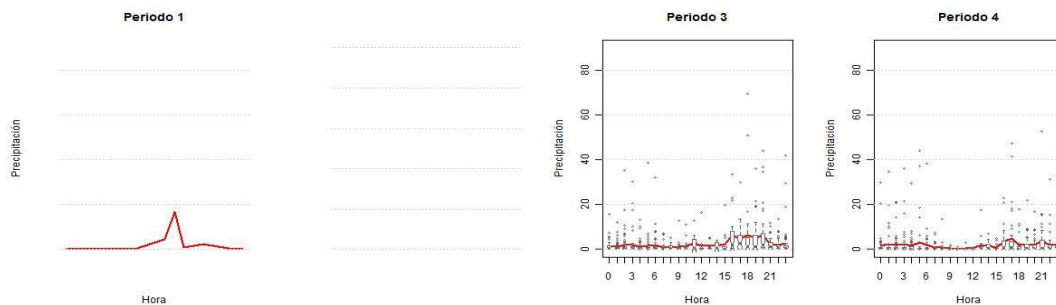


Figura 167 Diagrama de cajas precipitación horaria estación La Francia IDEAM (solo horas con precipitación mayor que cero) [mm]

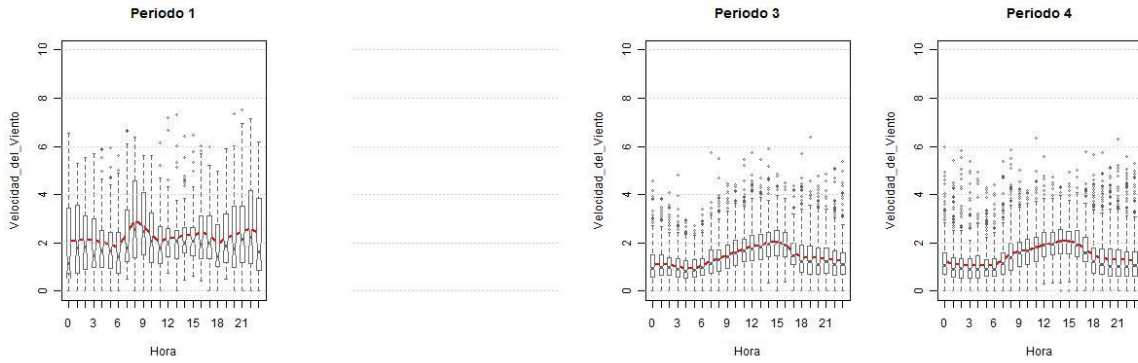


Figura 168 Diagrama de cajas velocidad del viento estación La Francia IDEAM [m/s]

A.5.3 Comportamiento del viento

A.5.3.1 Rosas de viento por periodo

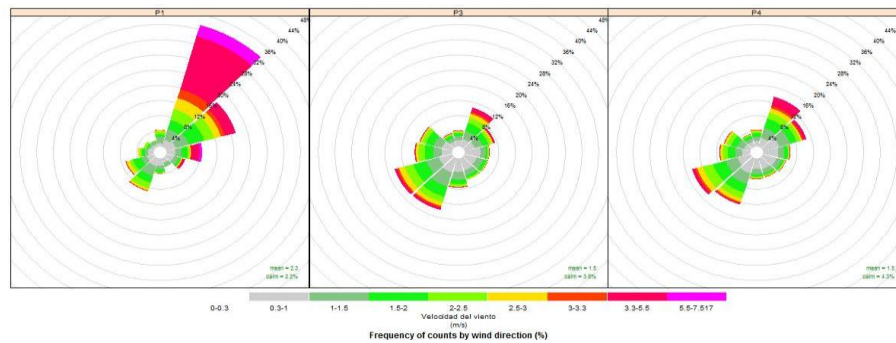


Figura 169 Rosa de vientos total por periodo estación La Francia IDEAM

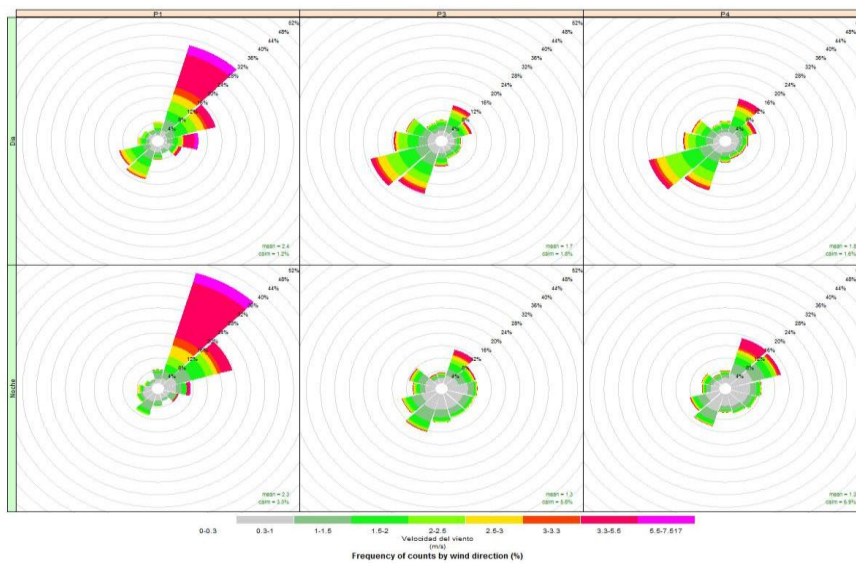


Figura 170 Rosa de vientos diurna y nocturna por periodo estación La Francia IDEAM



Figura 171 Rosas de viento por horas periodo 1 estación La Francia IDEAM

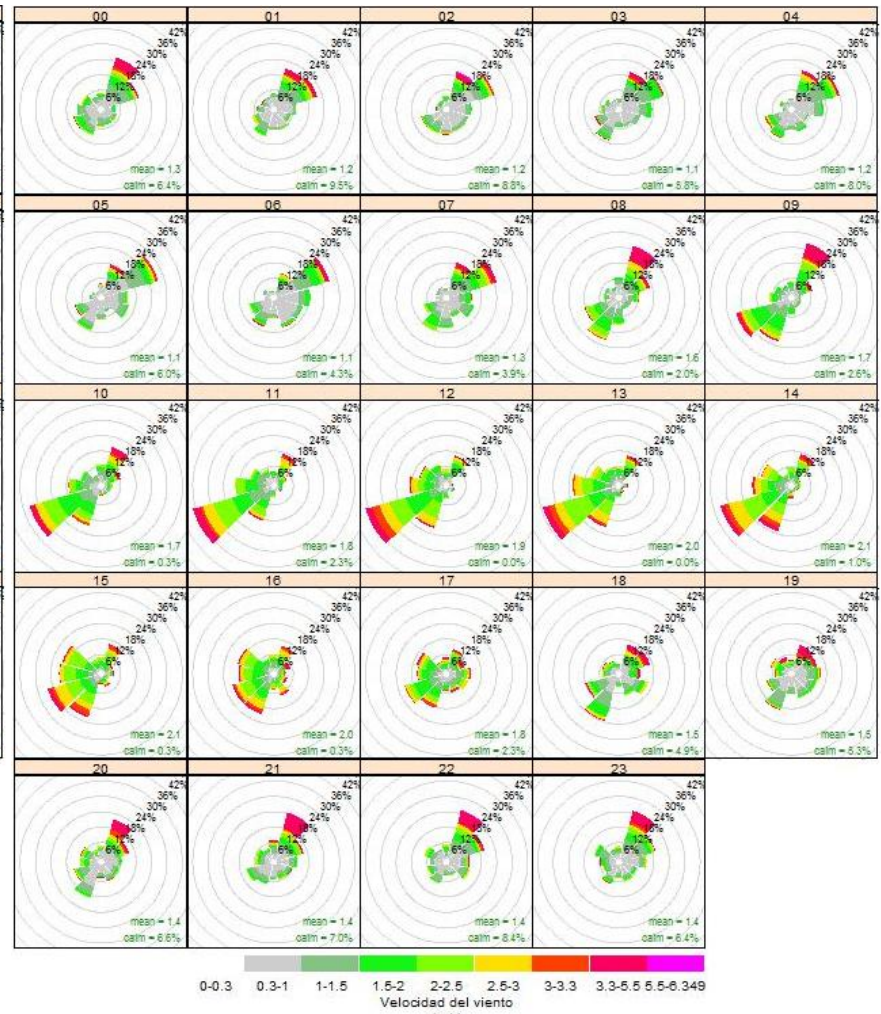


Figura 172 Rosas de viento periodo 4 estación La Francia IDEAM

A.5.3.2 Rosas de frecuencia por periodo

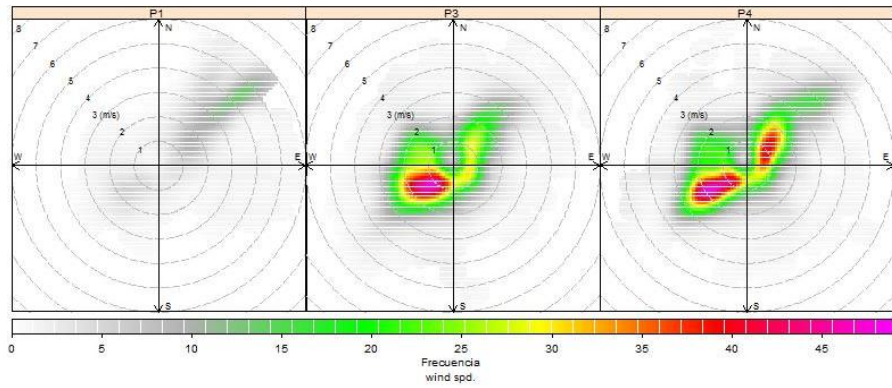


Figura 173 Rosa de frecuencia total por periodos estación La Francia IDEAM

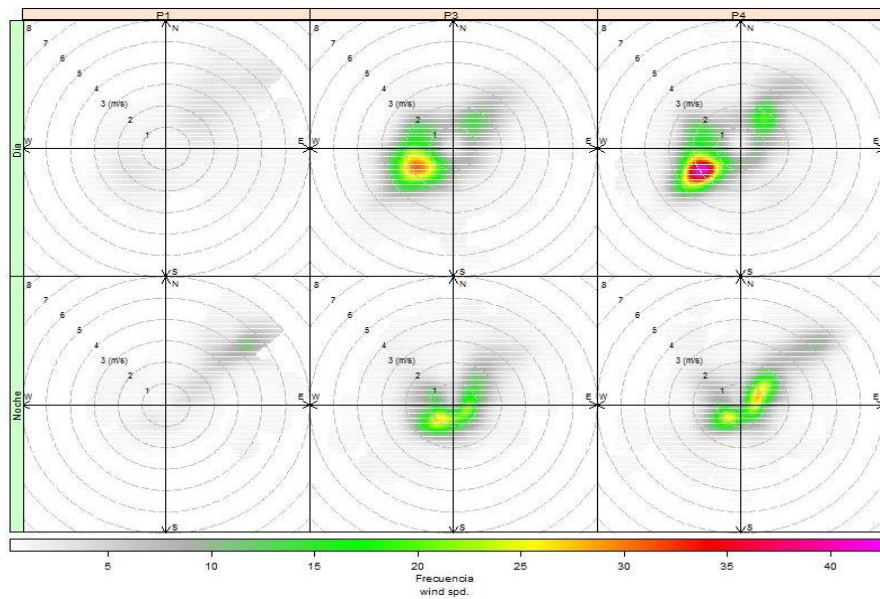


Figura 174 Rosa de frecuencia diurna y nocturna por periodo estación La Francia IDEAM

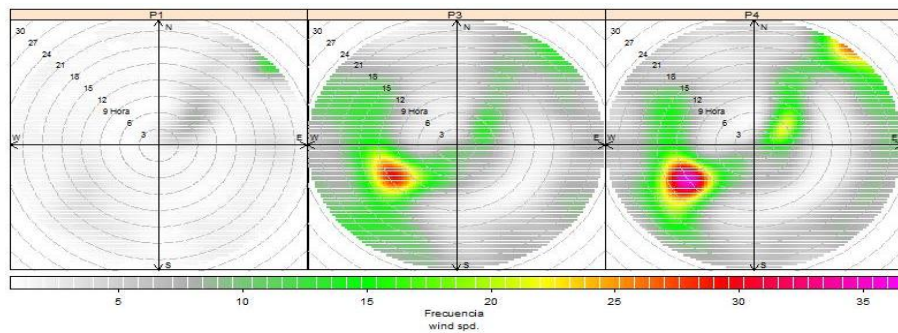


Figura 175 Rosa de frecuencia (dirección-hora) por periodos estación La Francia IDEAM

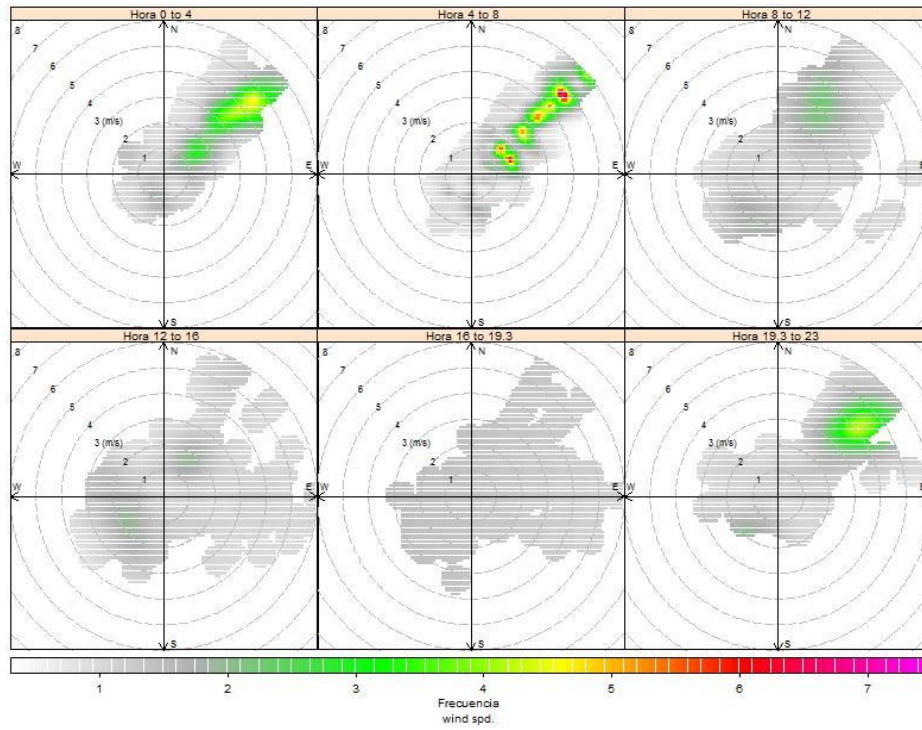


Figura 176 Rosa de frecuencia por horas periodo 1 estación La Francia IDEAM

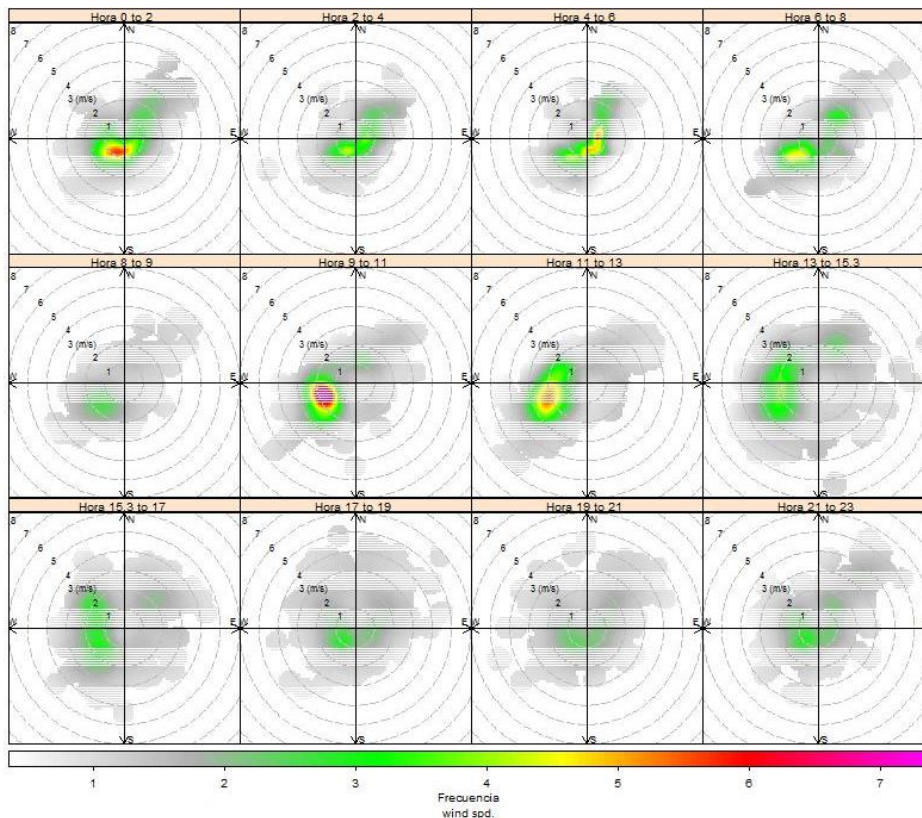


Figura 177 Rosa de frecuencia por horas periodo 3 estación La Francia IDEAM

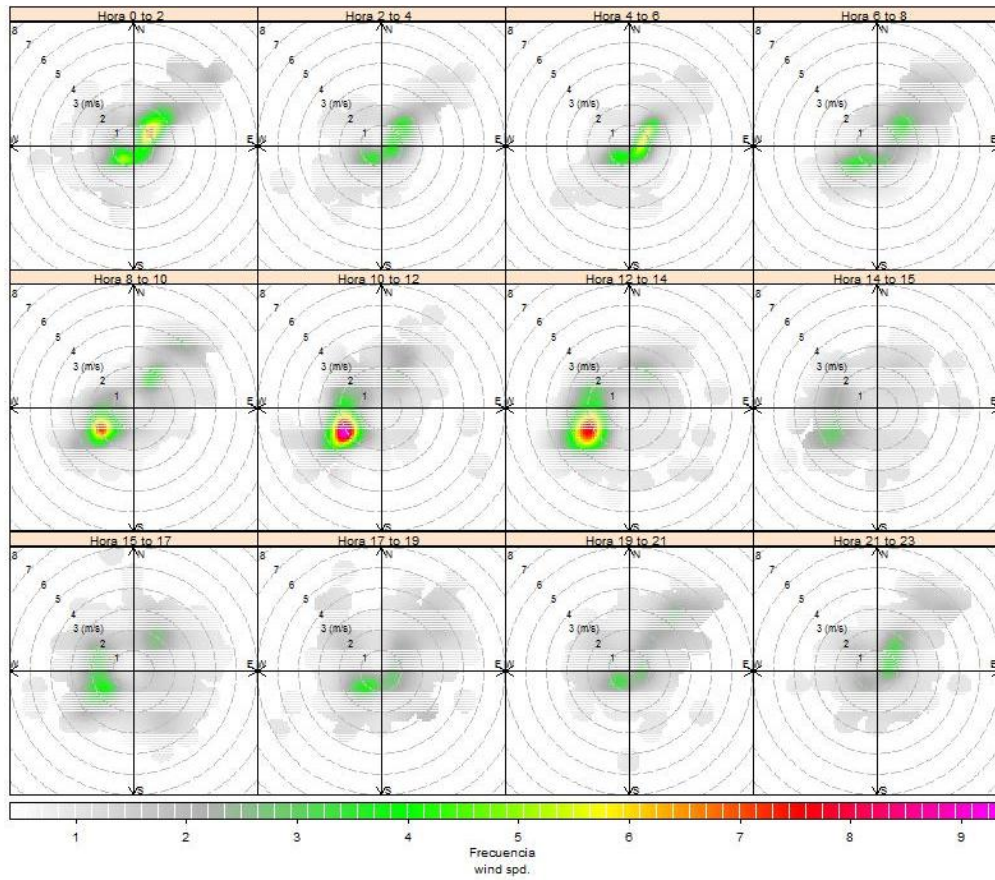
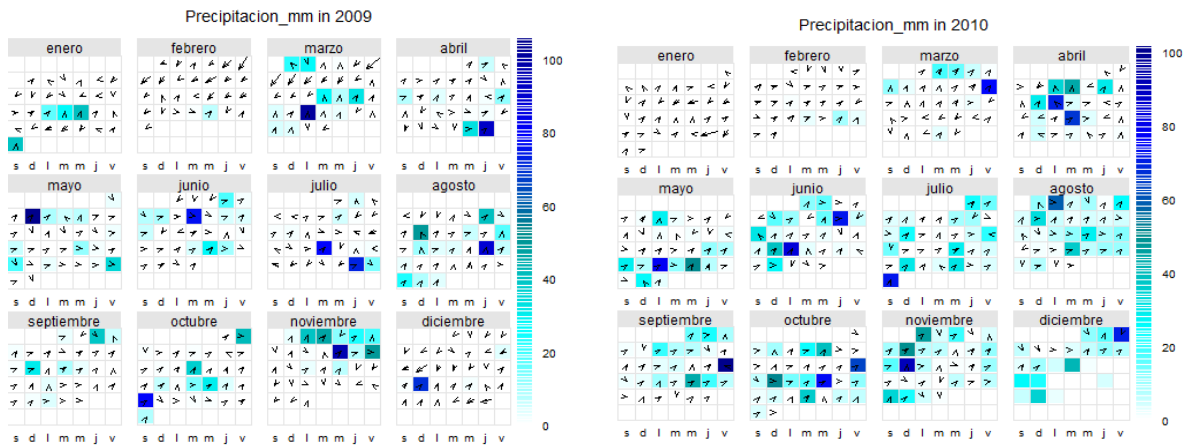


Figura 178 Rosa de frecuencia por horas periodo 4 estación La Francia IDEAM

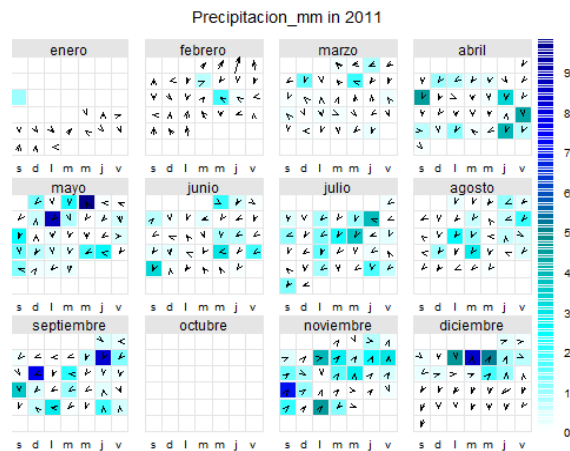
Anexo B Calendarios meteorológicos, comportamiento diario de las principales variables.

B1 Calendarios meteorológicos Estación Borrego



a) Precipitación 2009

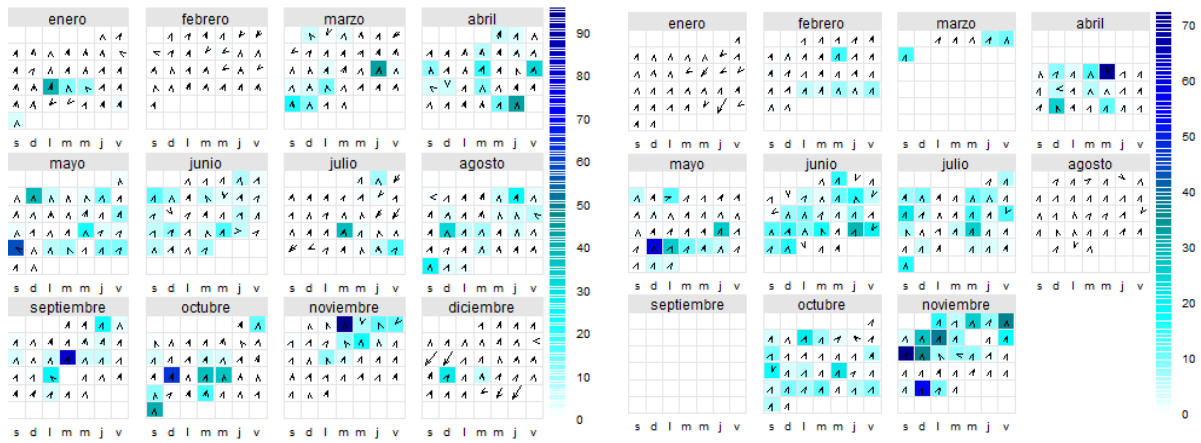
b) Precipitación 2010



c) Precipitación 2011

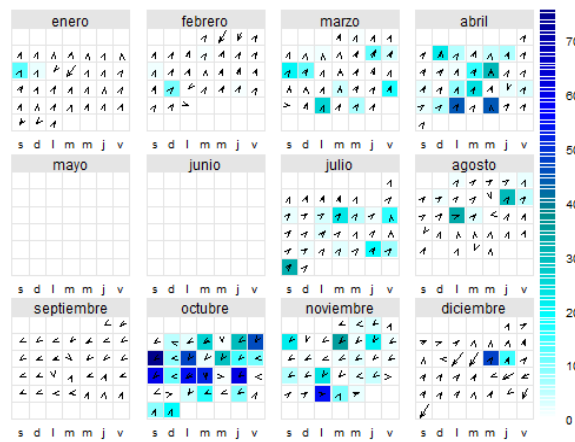
Figura 179 Calendarios meteorológicos estación Borrego

B2 Calendarios meteorológicos Estación Cerrolargo



a) Precipitación 2009

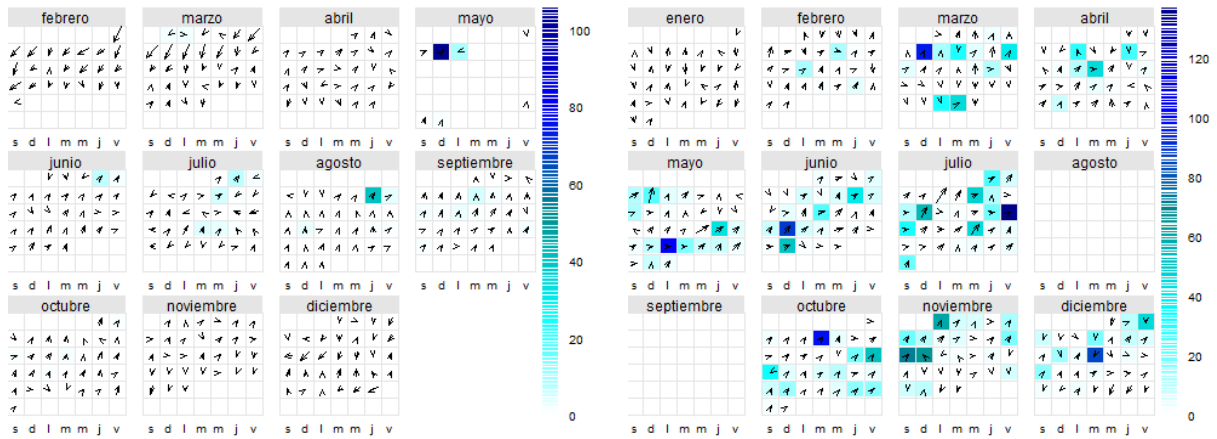
b) Precipitación 2010



c) Precipitación 2011

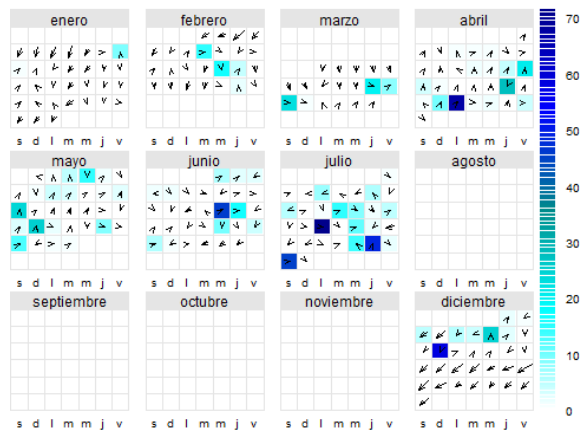
Figura 180 Calendarios meteorológicos estación Cerrolargo

B3 Calendarios meteorológicos Estación Descanso



a) Precipitación 2009

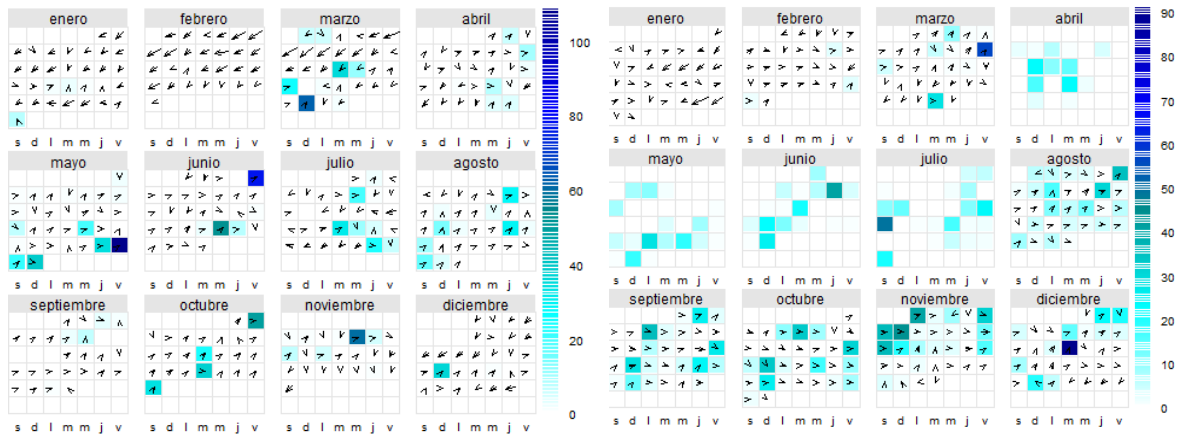
b) Precipitación 2010



c) Precipitación 2011

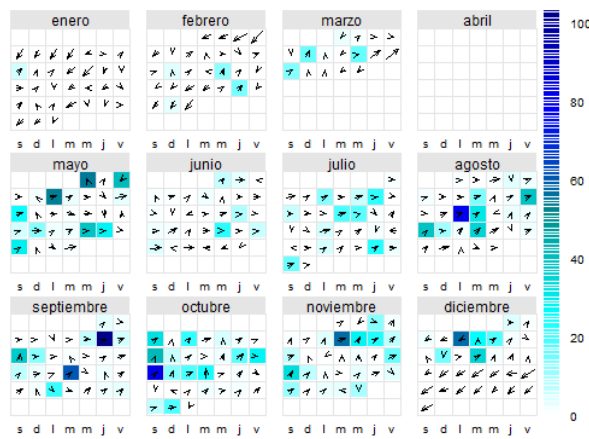
Figura 181 Calendarios meteorológicos estación Descanso

B4 Calendario meteorológico Estación Calenturitas



a) Precipitación 2009

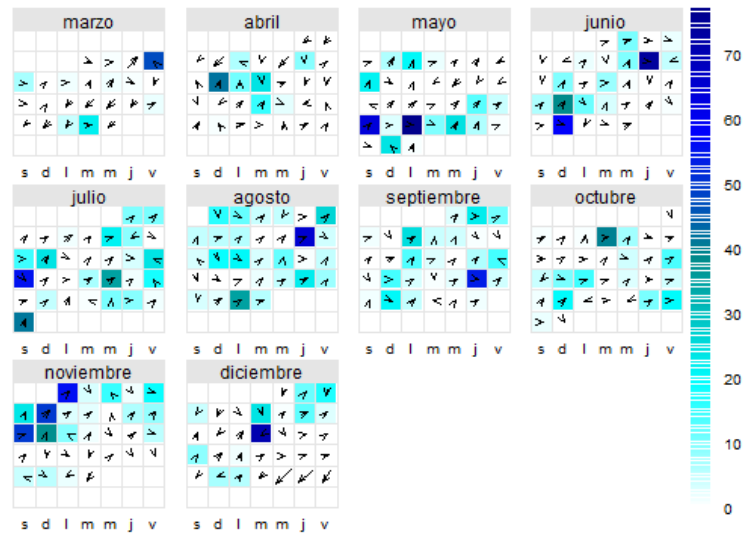
b) Precipitación 2010



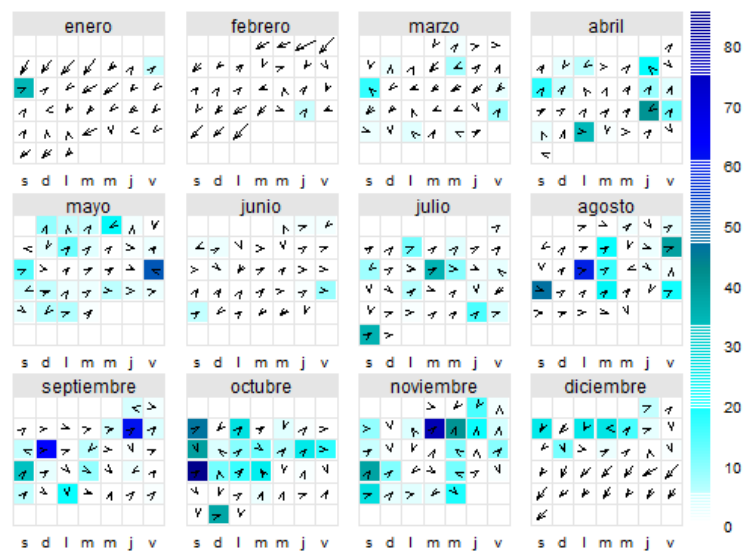
c) Precipitación 2011

Figura 182 Calendarios meteorológicos estación Calenturitas

B5 Calendarios meteorológicos Estación La Francia IDEAM



a) Precipitación 2010



b) Precipitación 2011

Figura 183 Calendarios meteorológicos estación La Francia

Anexo C Fichas descriptivas de los niveles de PM

C1 Series de tiempo

C.1.1 Estaciones de fondo urbano TSP (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

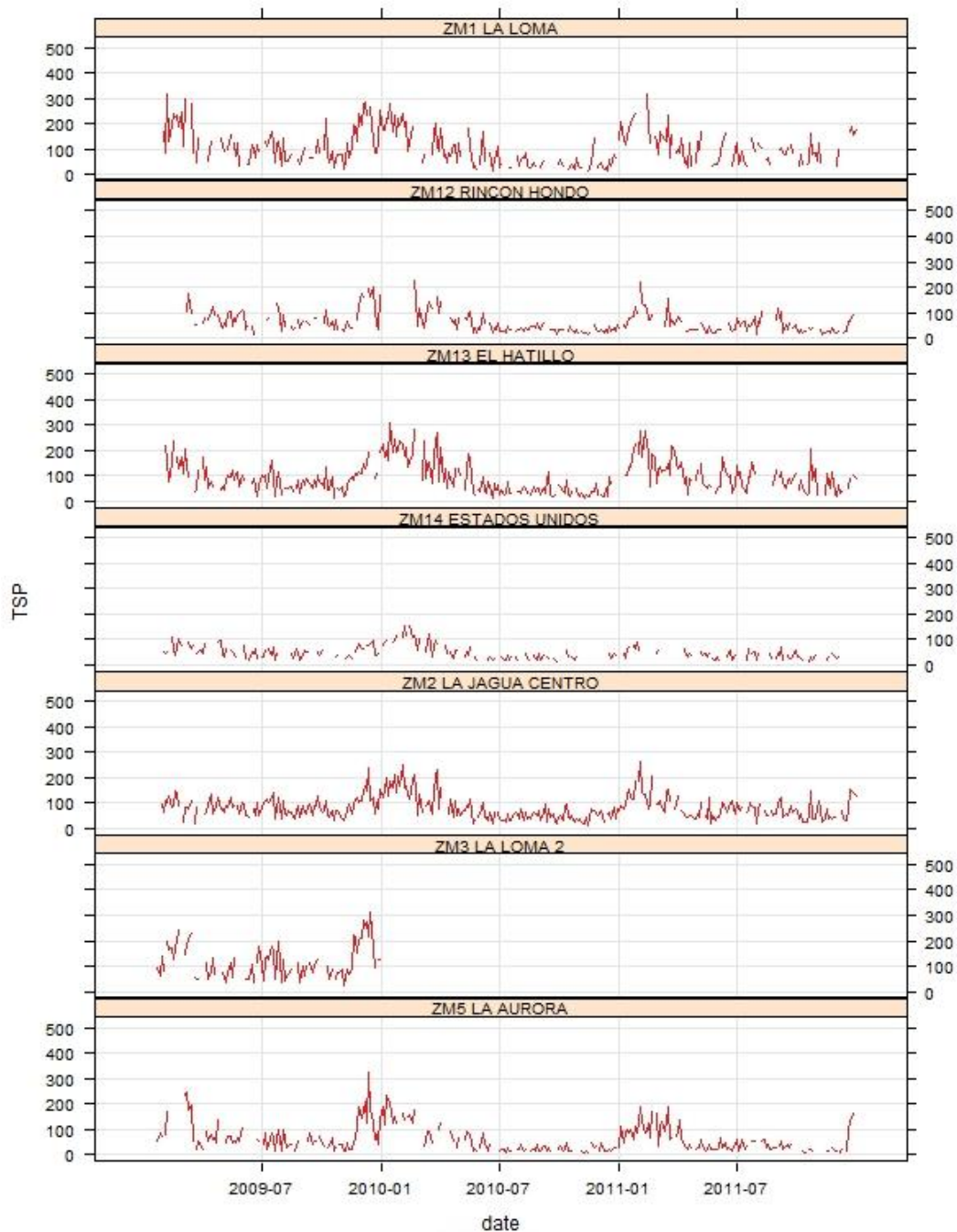


Figura 184 Serie de tiempo TSP estaciones de fondo urbano (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C.1.2 Estaciones de fondo Urbano PM₁₀ (concentraciones en µg/m³)

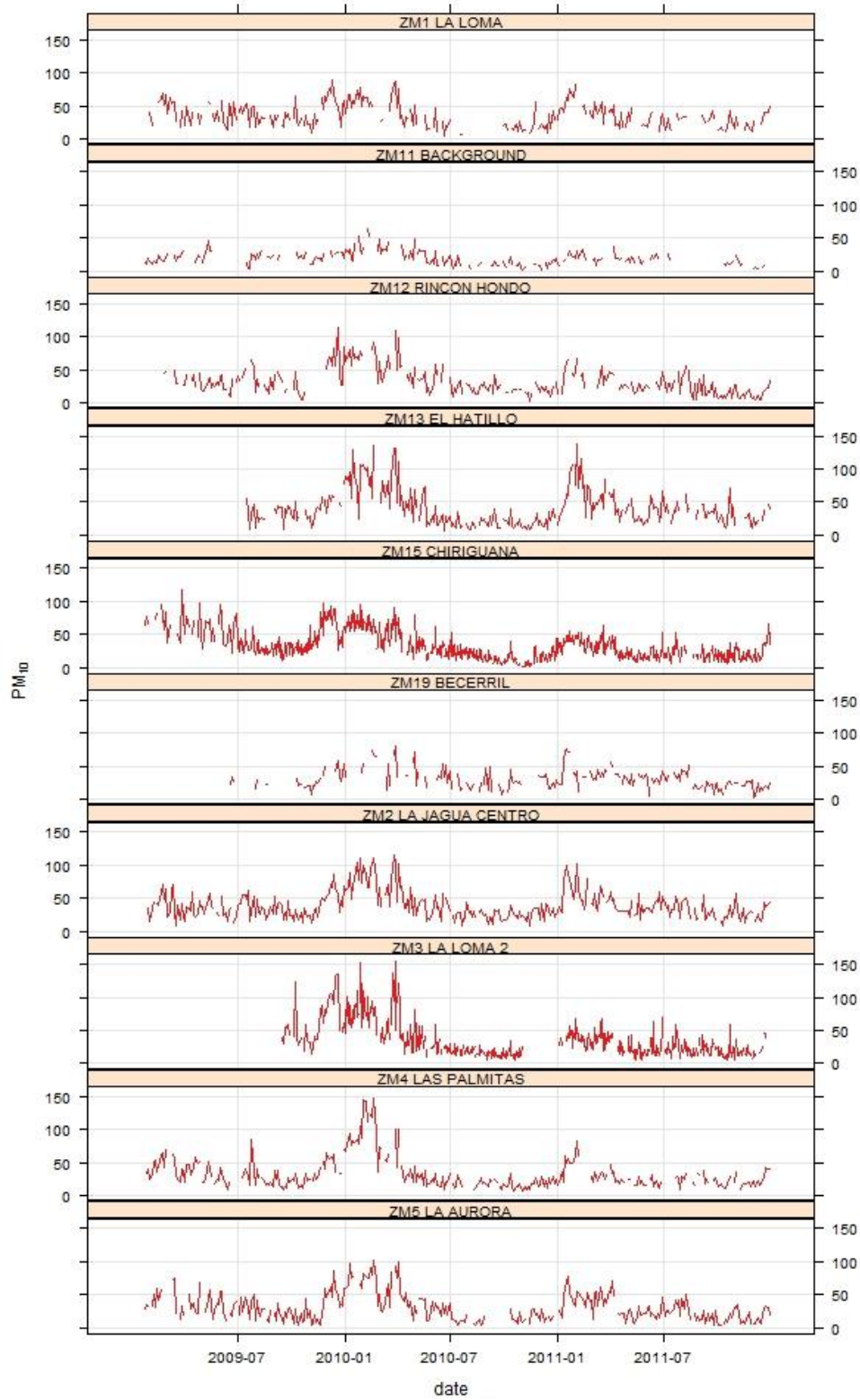


Figura 185 Serie de tiempo PM₁₀ estaciones de fondo urbano (concentraciones en µg/m³)

C.1.3 Estaciones de efecto de trafico TSP (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

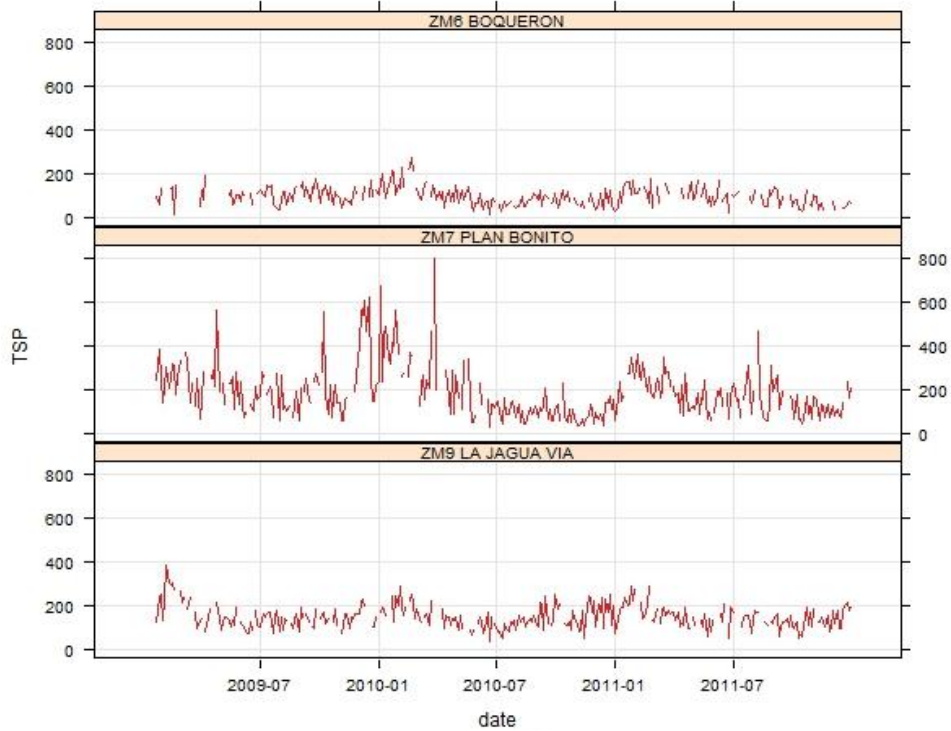


Figura 186 Serie de tiempo TSP estaciones de efecto de trafico (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C.1.4 Estaciones de efecto de trafico PM_{10} (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

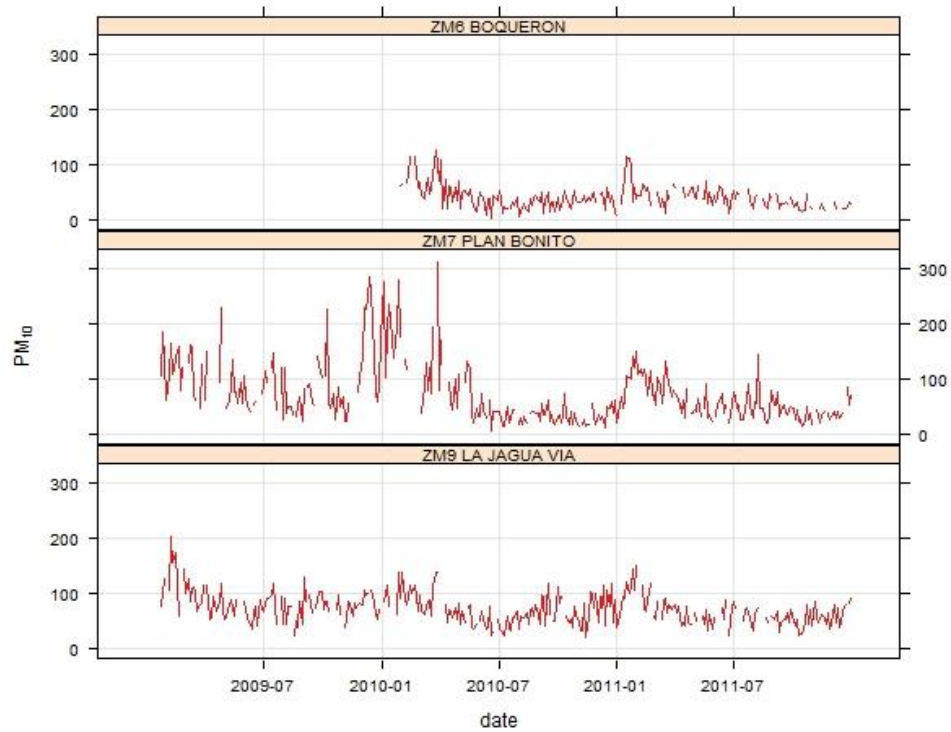


Figura 187 Serie de tiempo PM_{10} estaciones de efecto de trafico (concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C2 Gráficos de caja para la serie de tiempo

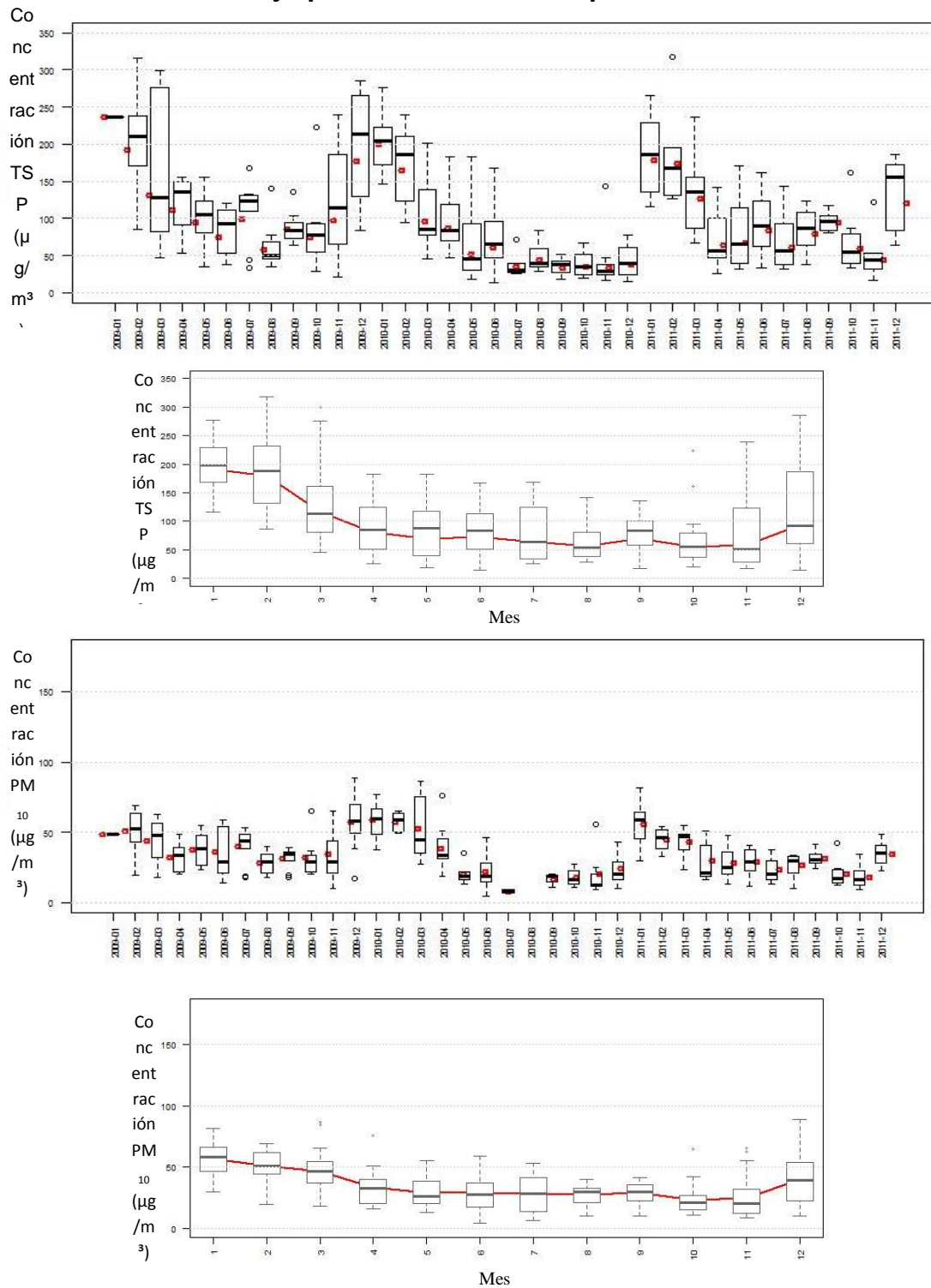


Figura 188 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM1

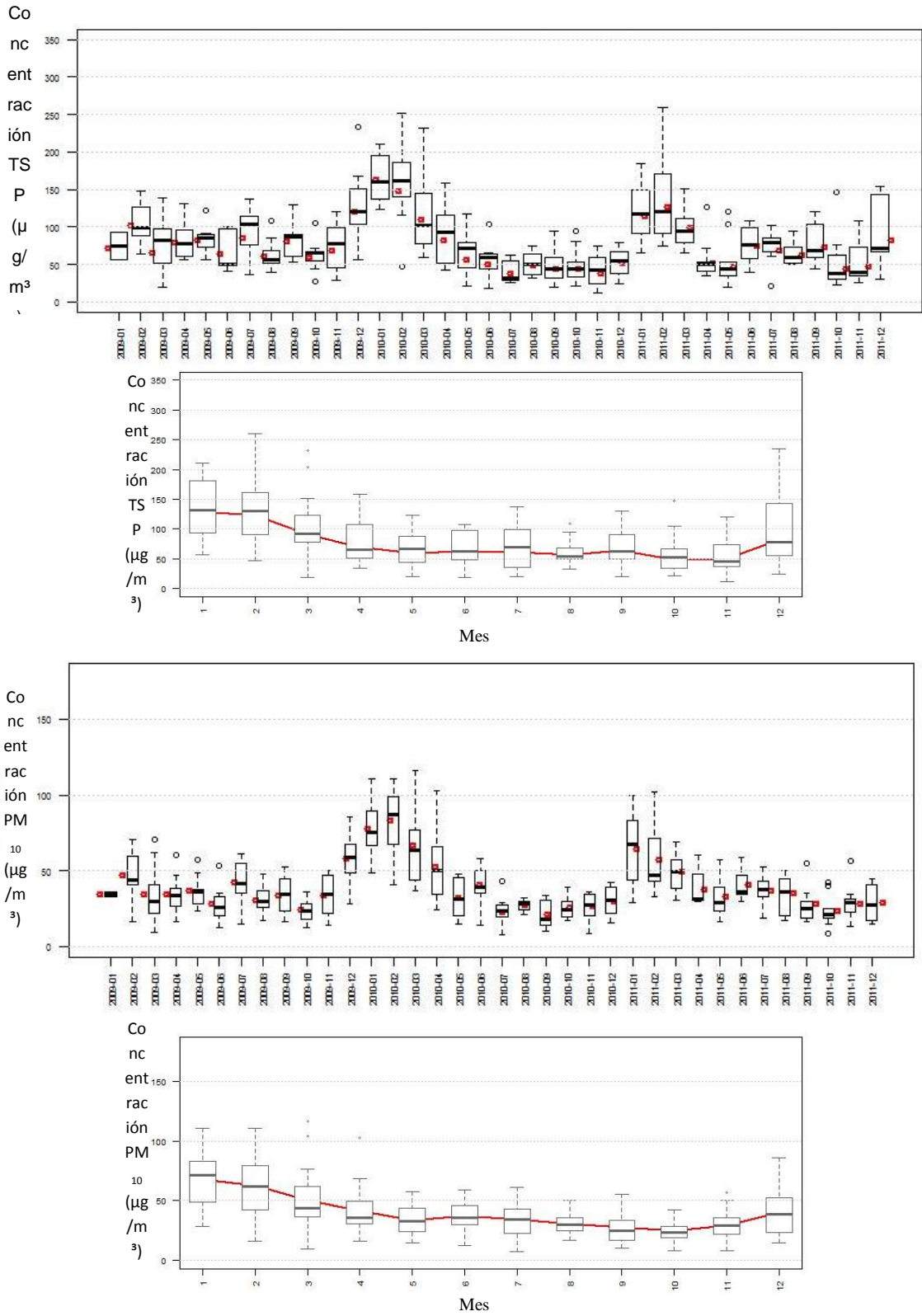


Figura 189 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM2

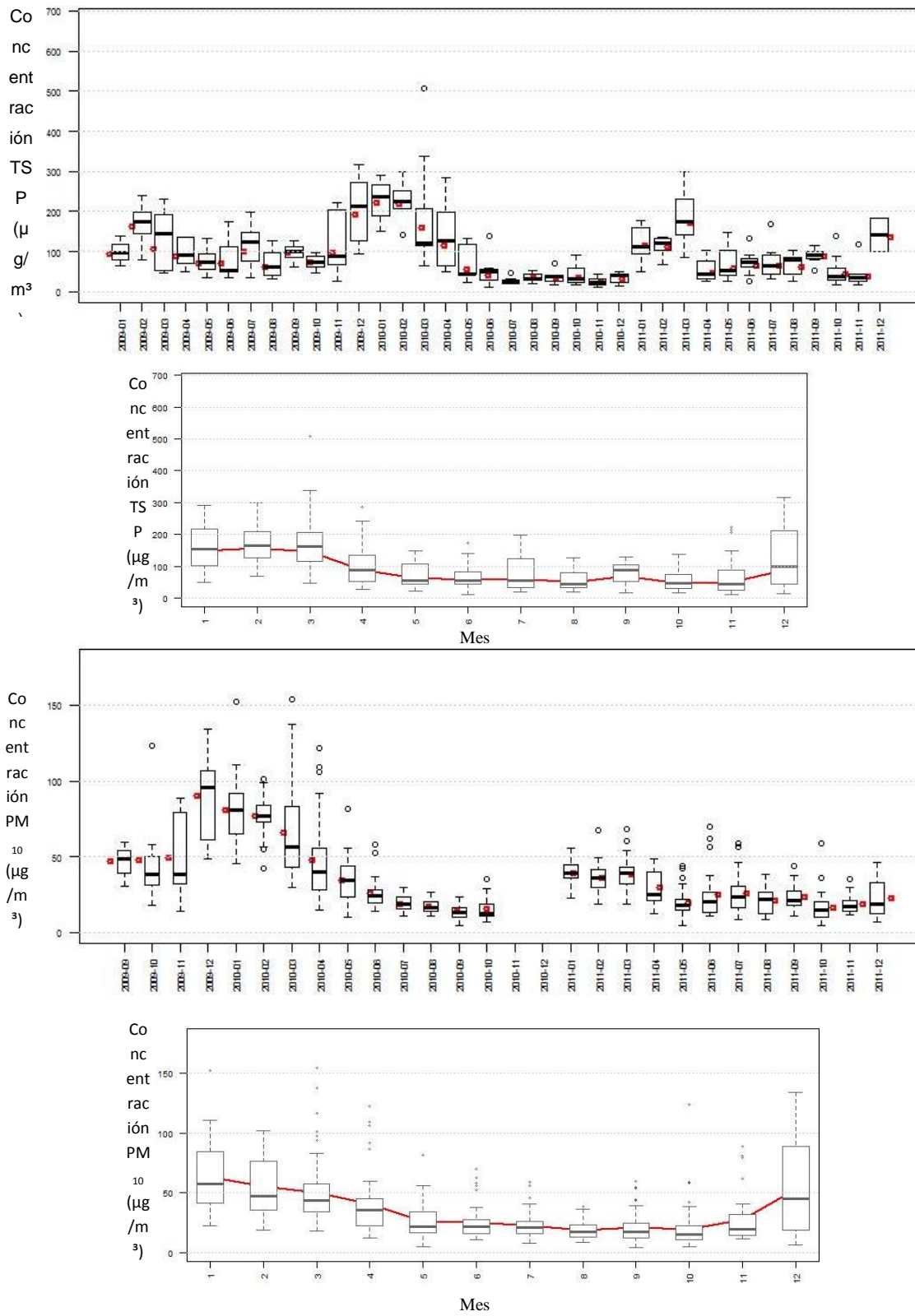


Figura 190 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM3

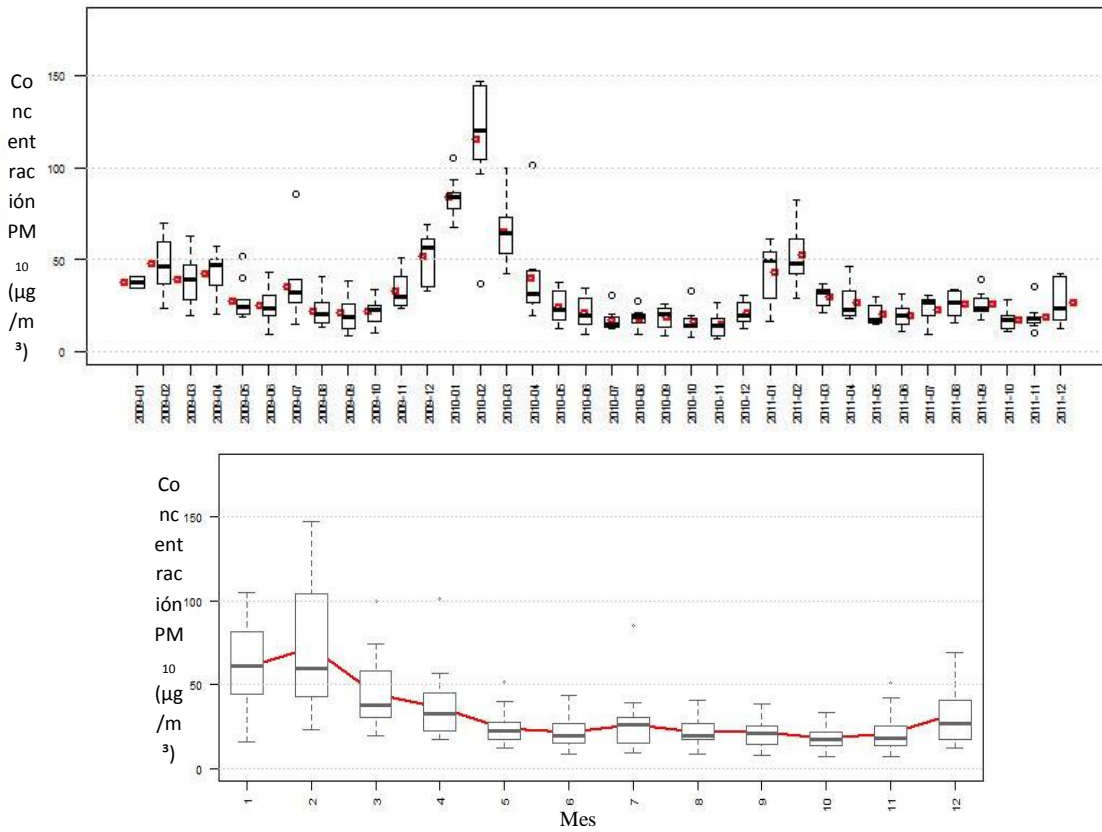


Figura 191 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM4

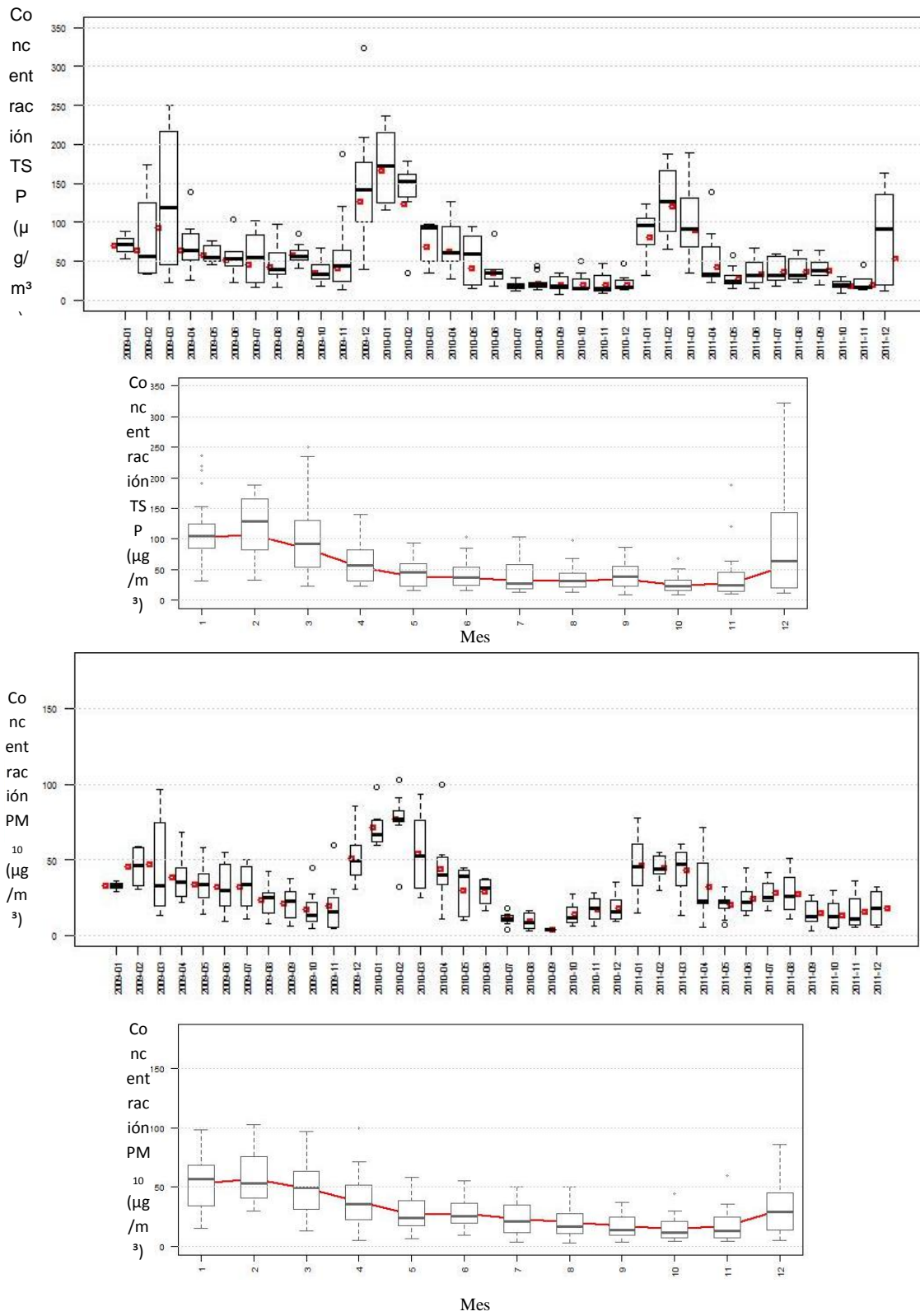


Figura 192 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM5

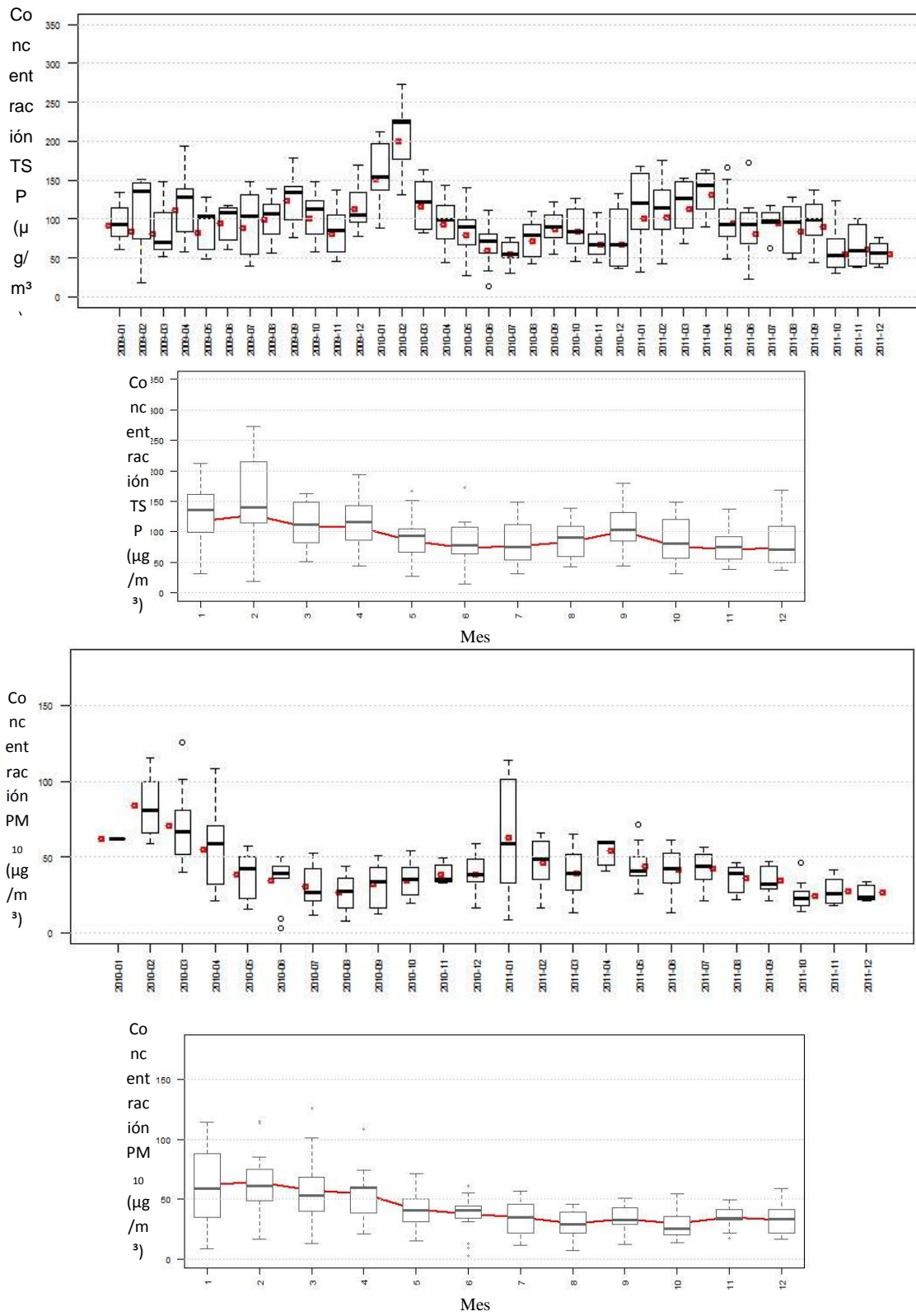


Figura 193 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM6

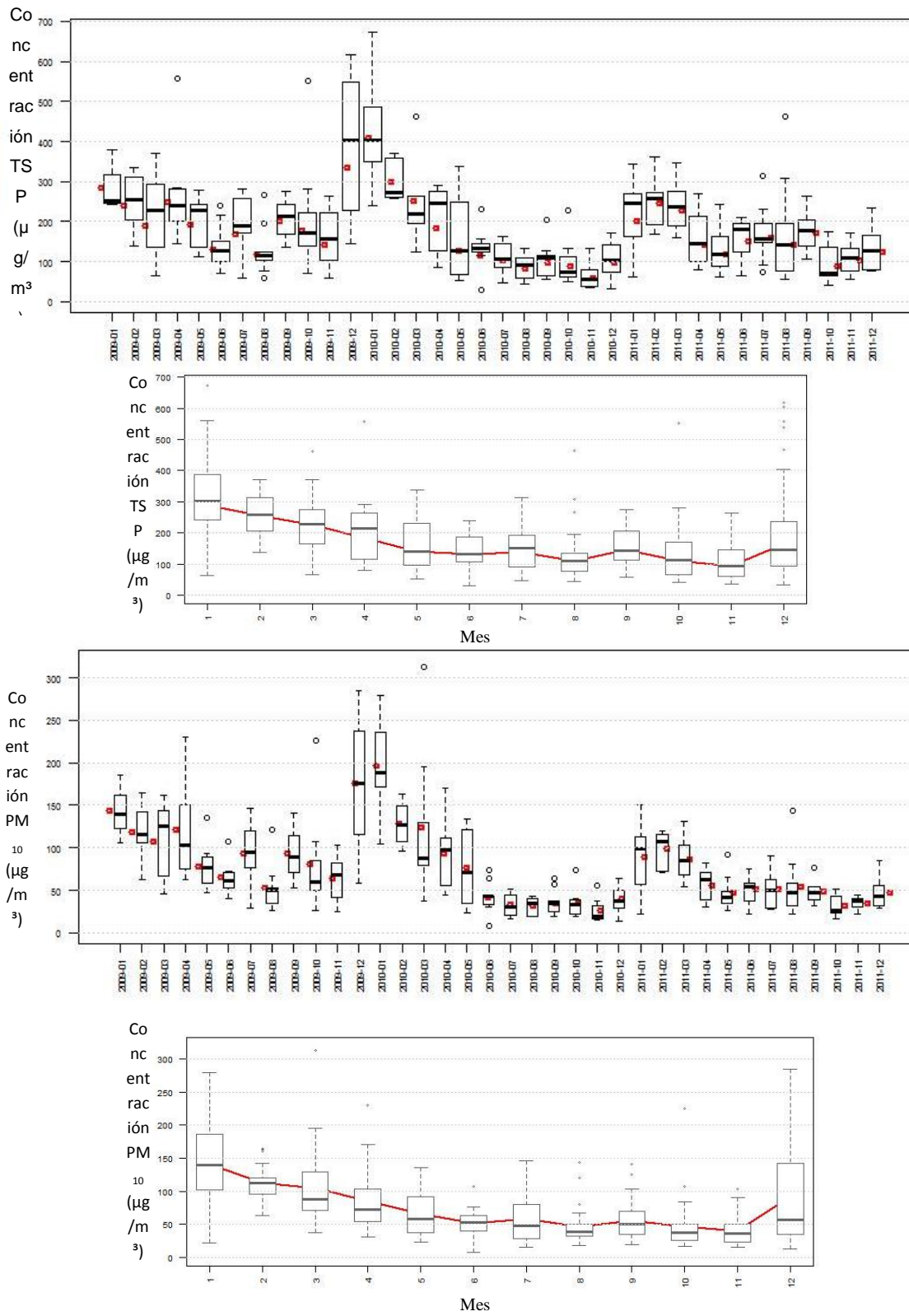


Figura 194 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM7

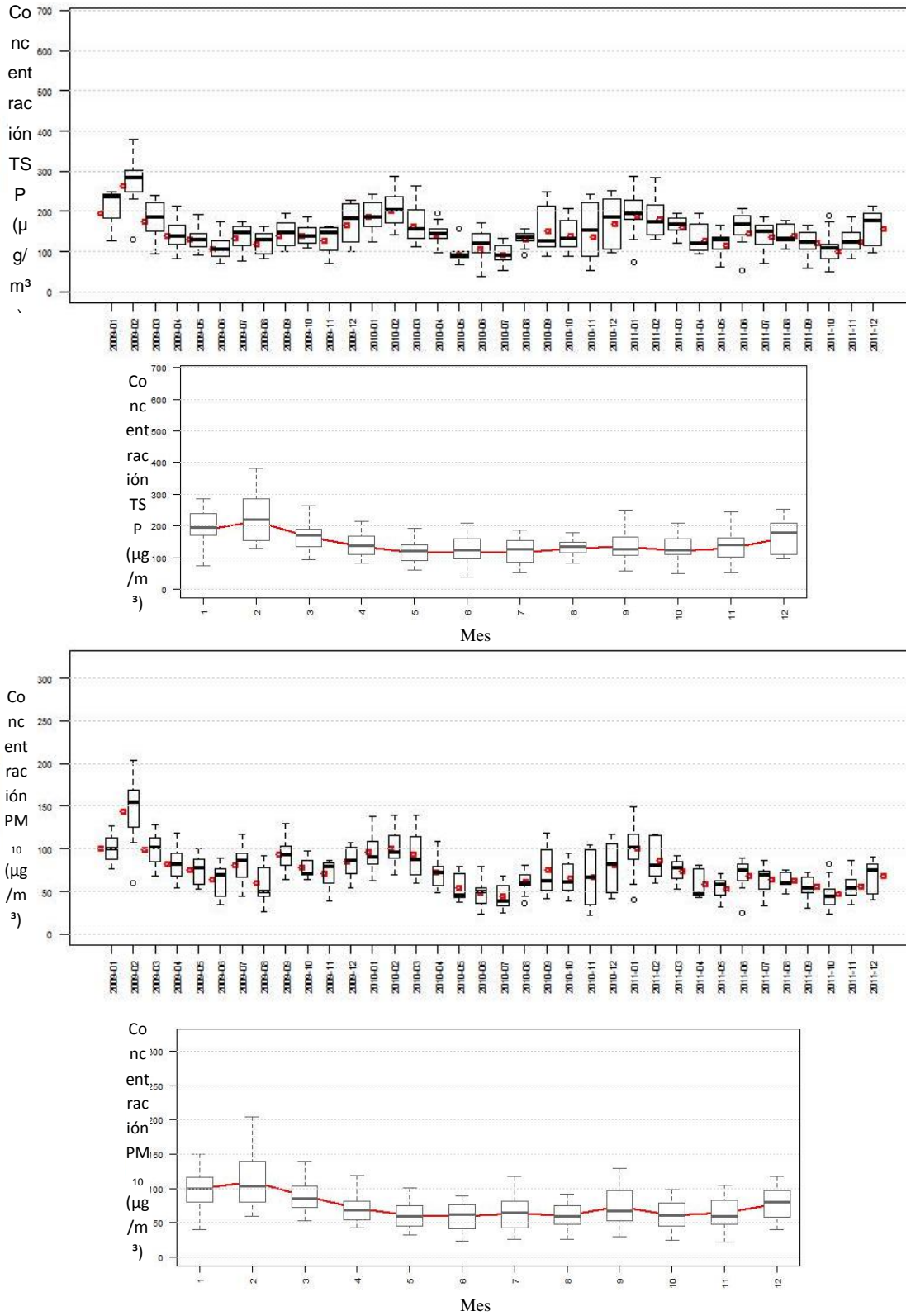


Figura 195 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM9

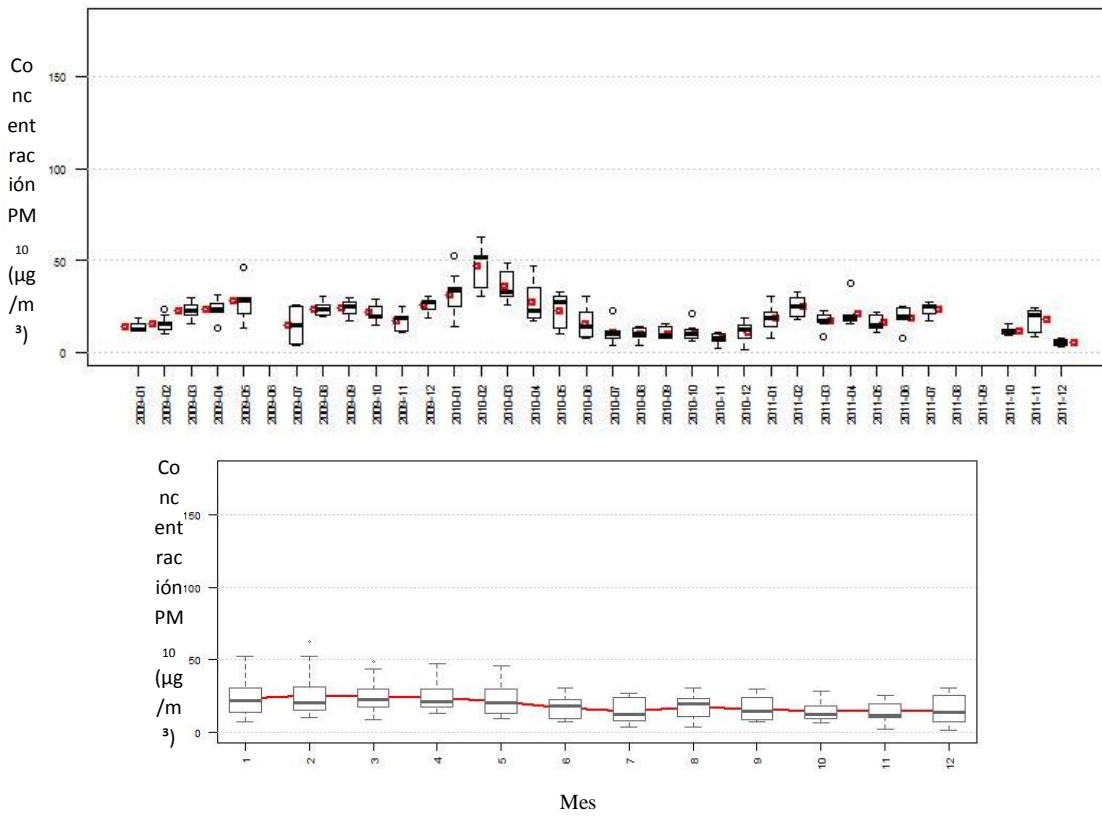


Figura 196 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM11

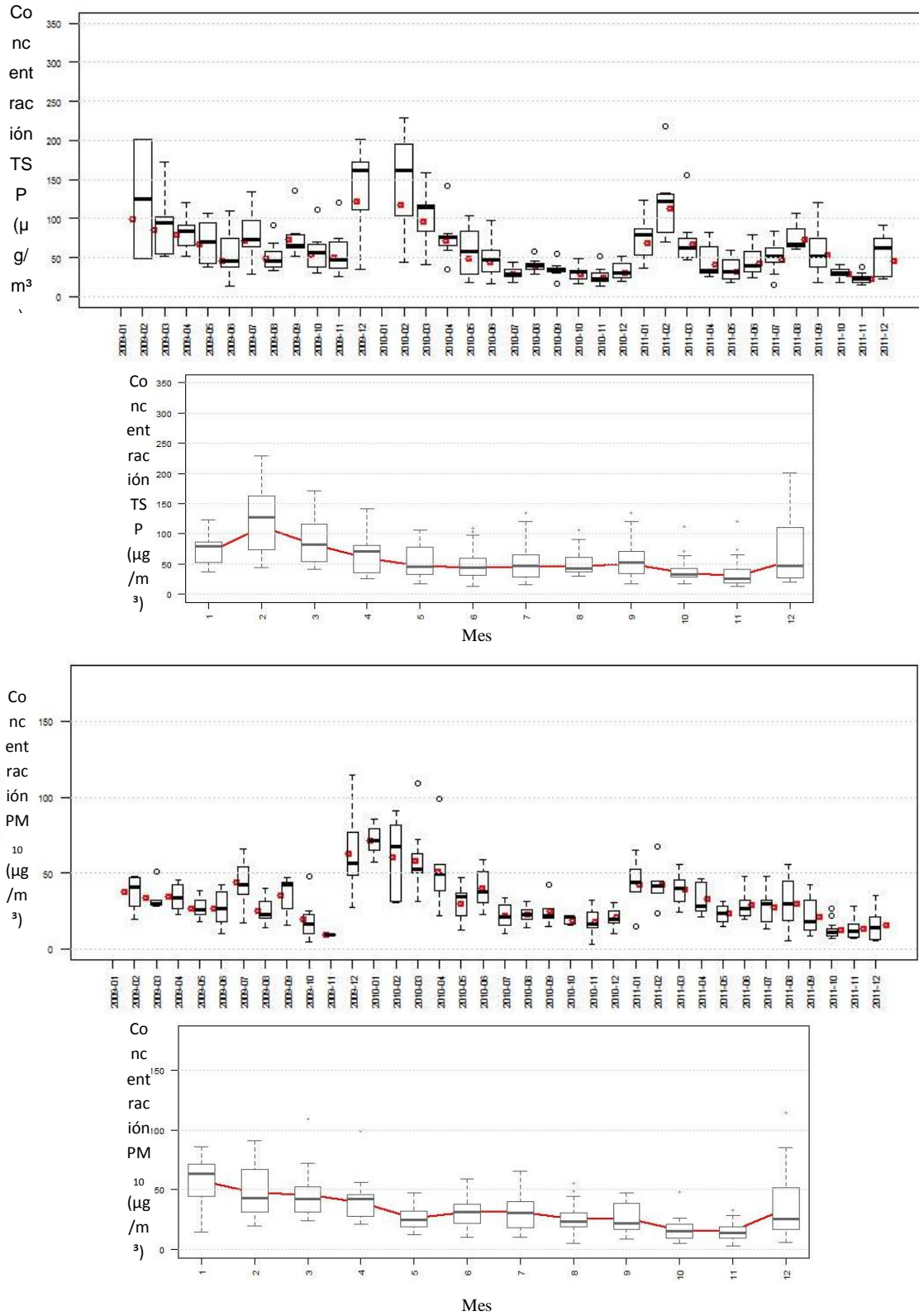


Figura 197 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM12

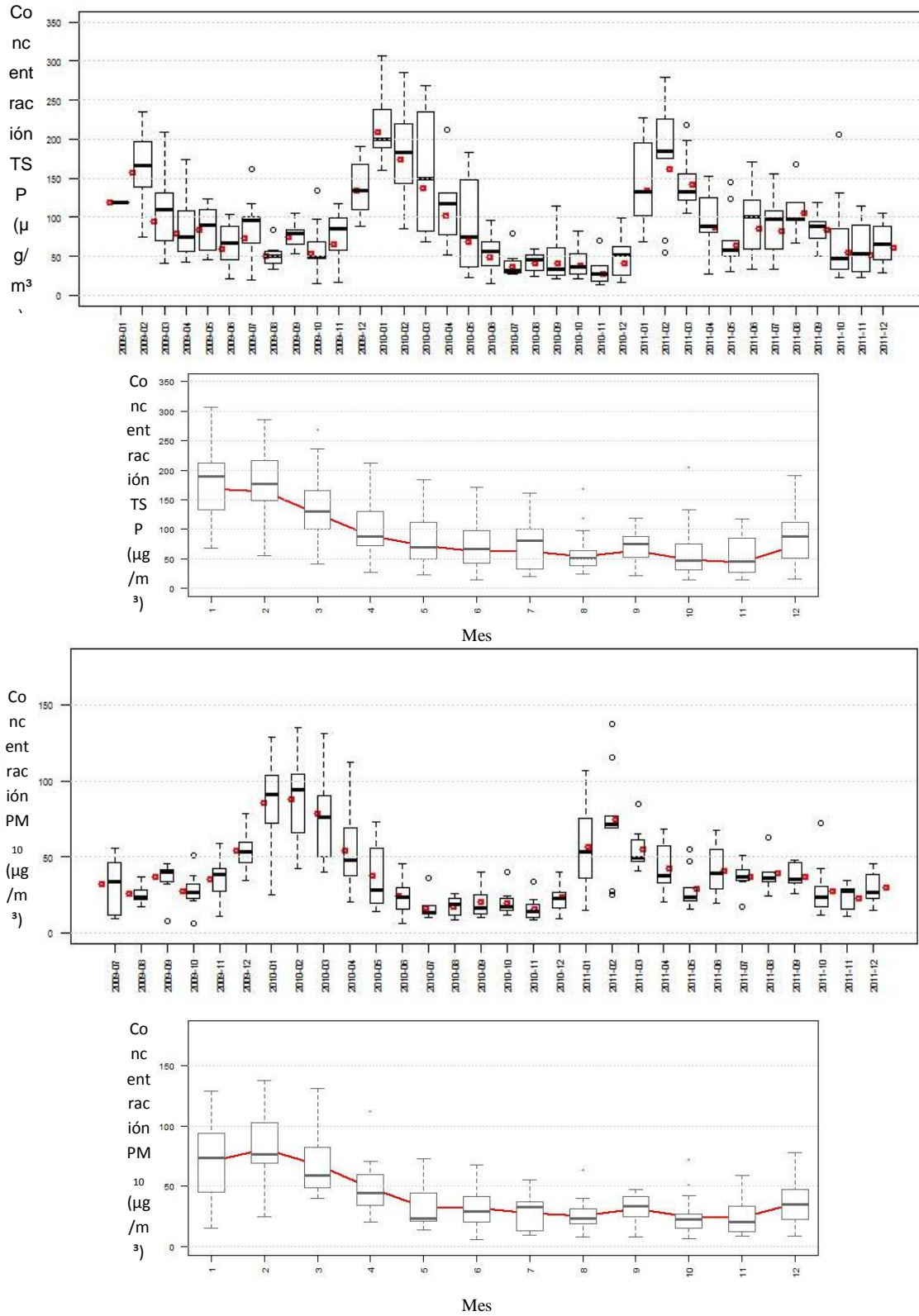


Figura 198 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM13

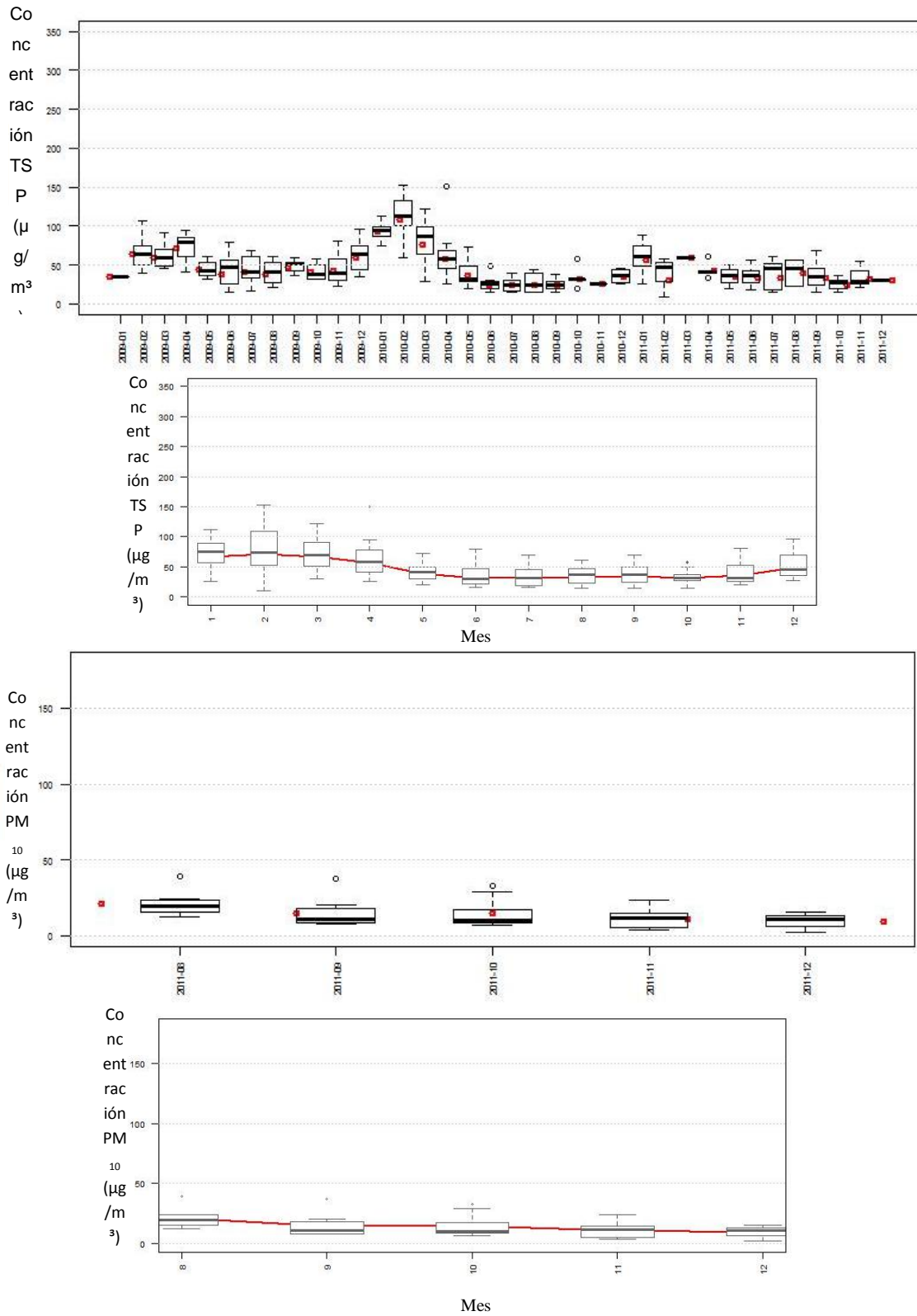


Figura 199 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM14

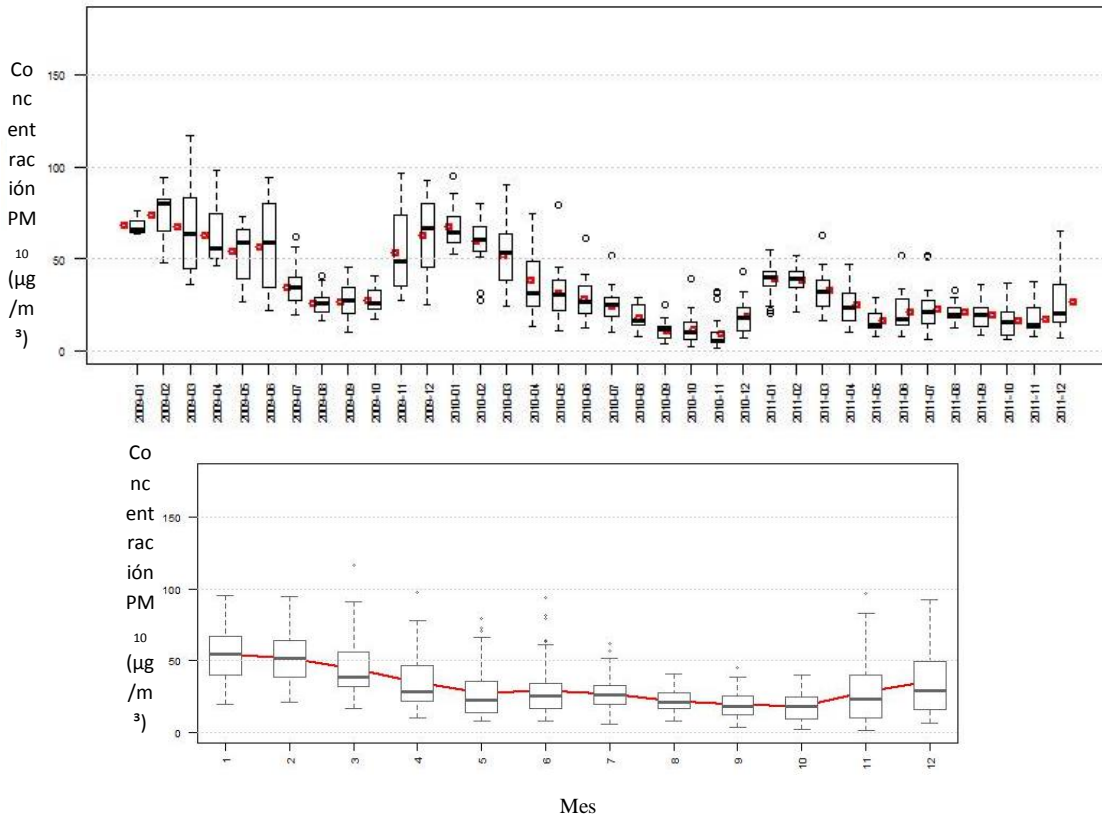


Figura 200 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM15

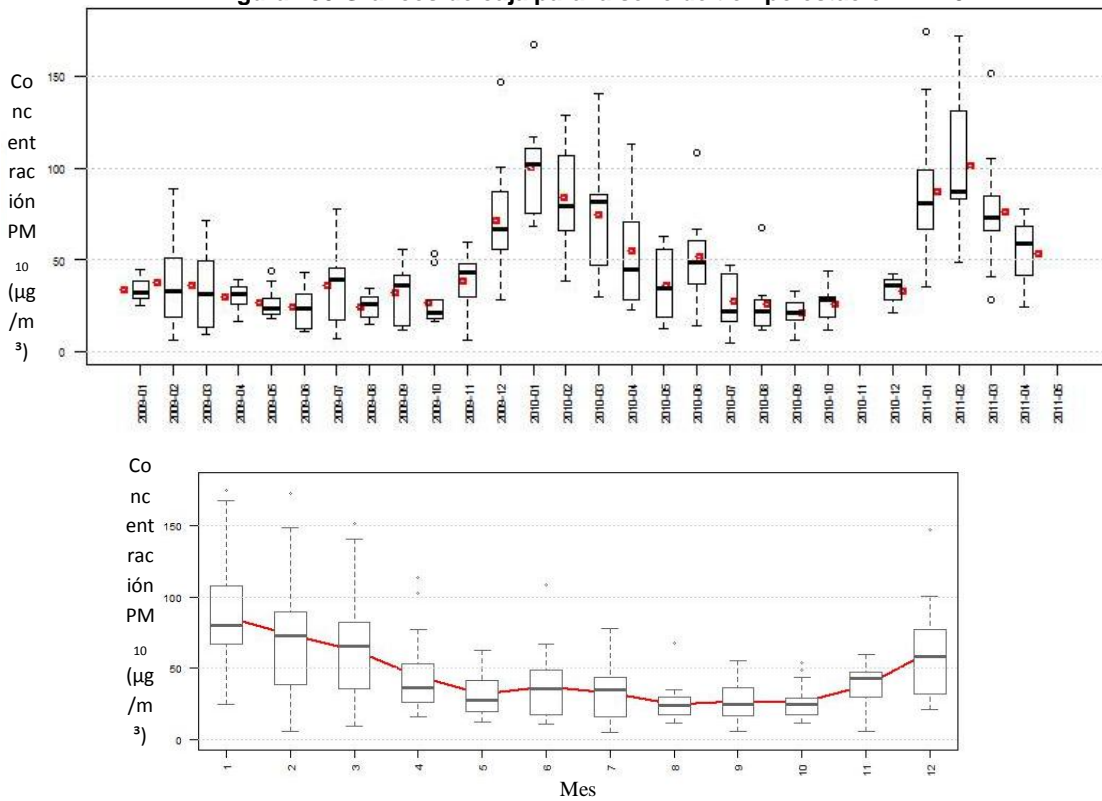


Figura 201 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM18

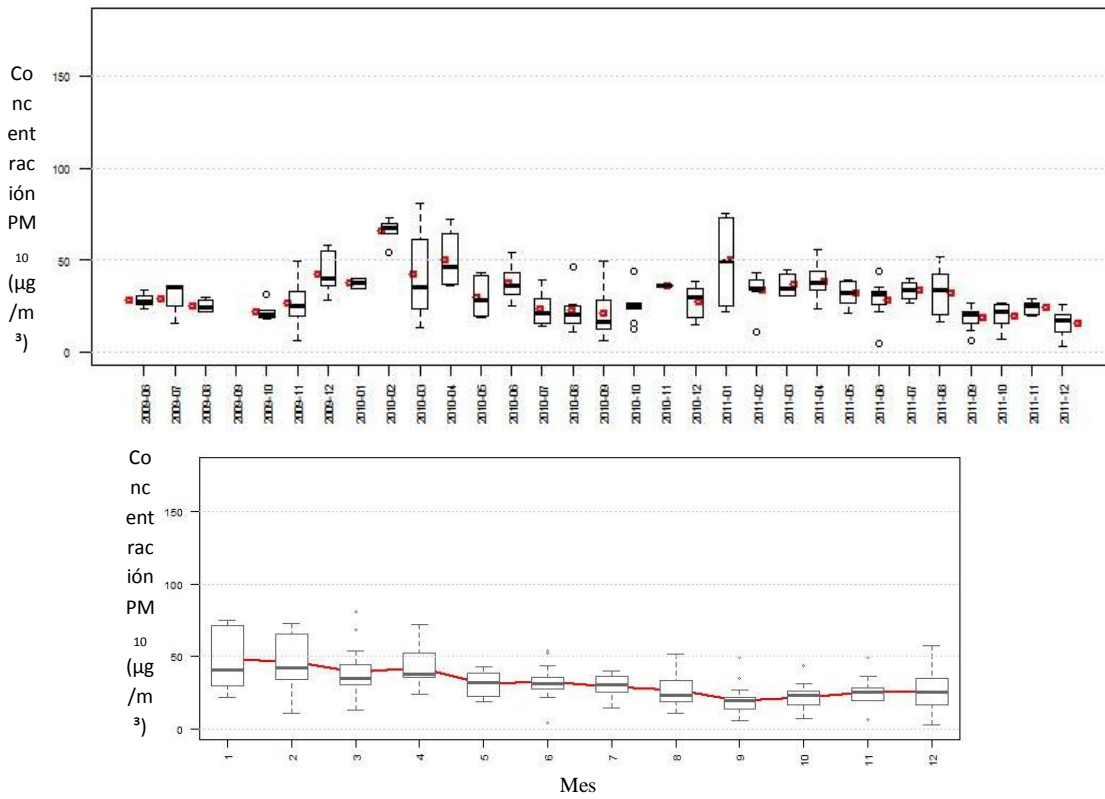


Figura 202 Gráficos de caja para la serie de tiempo estación ZM19

C3 Correlación entre estaciones de calidad de aire para la variable TSP.

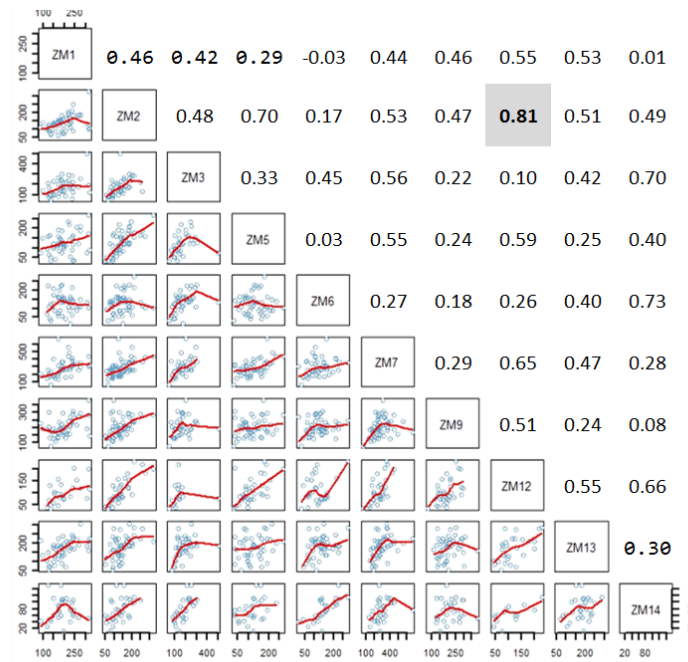


Figura 203 Correlación estaciones de TSP Periodo 1

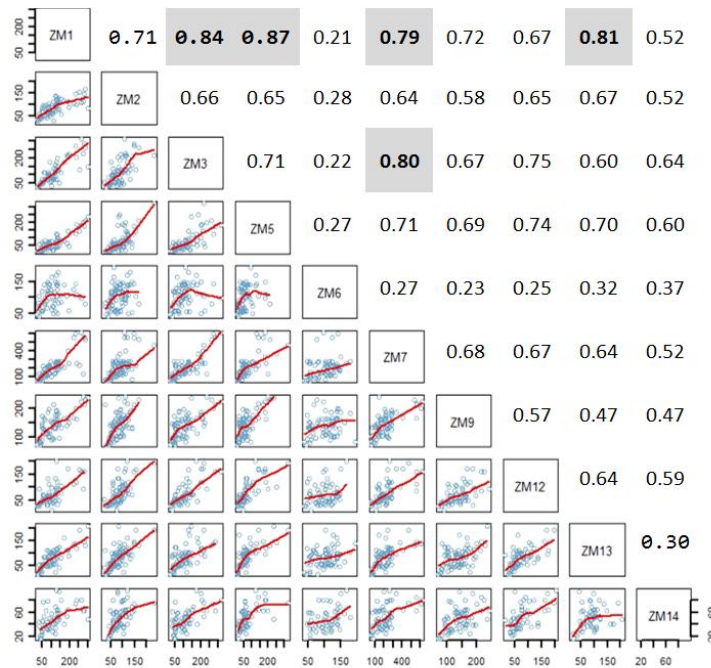


Figura 204 Correlación estaciones de TSP Periodo 2

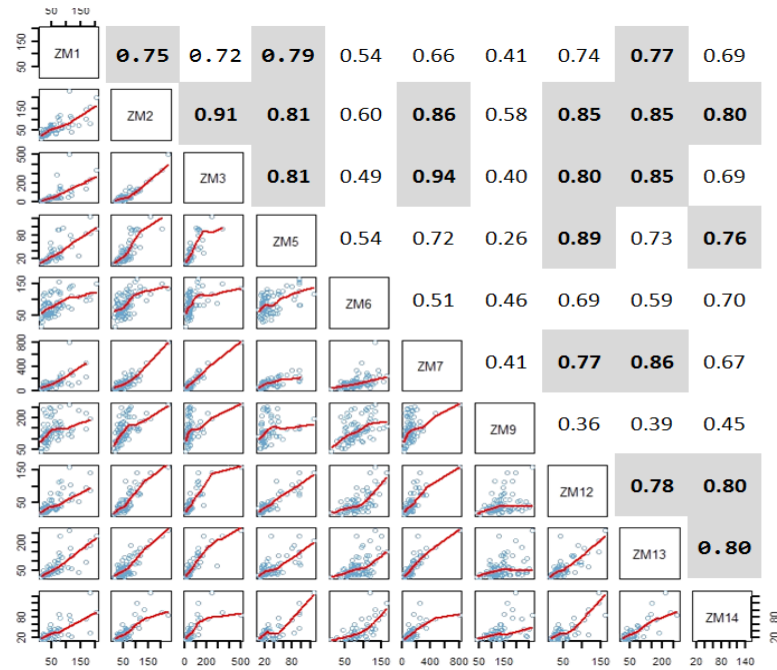


Figura 205 Correlación estaciones de TSP Periodo 3

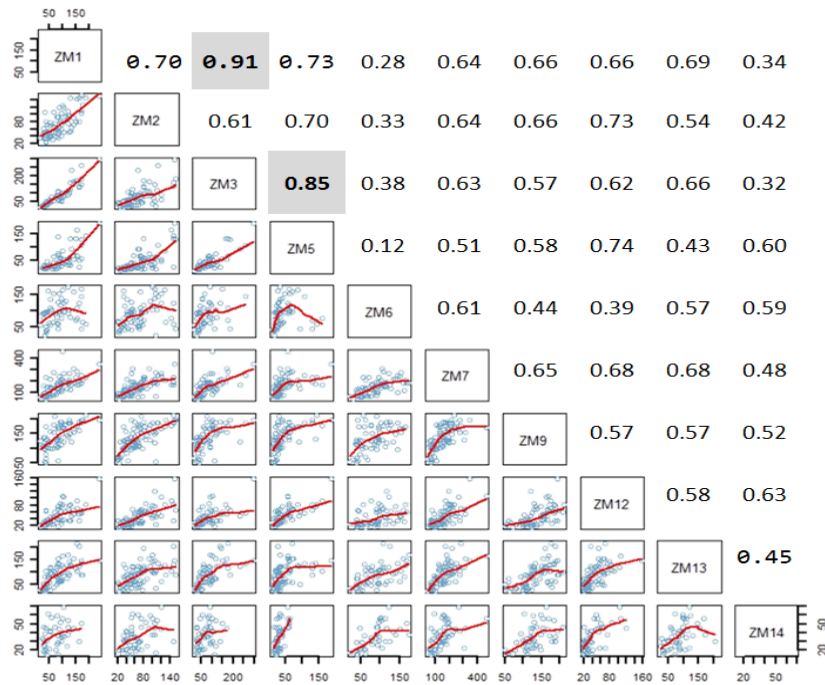


Figura 206 Correlación estaciones de TSP Periodo 4

C4 Correlación entre estaciones de calidad de aire para la variable PM_{10} .

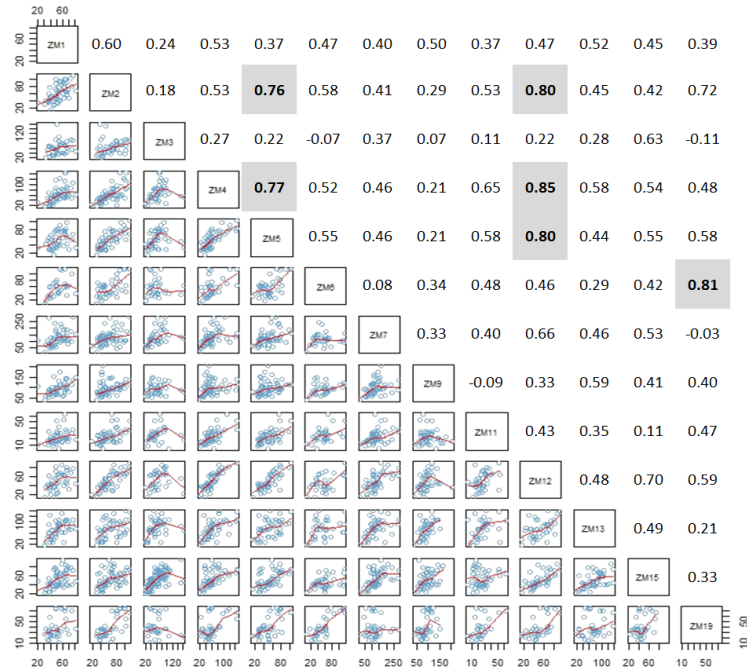


Figura 207 Correlación estaciones de PM_{10} Periodo 1

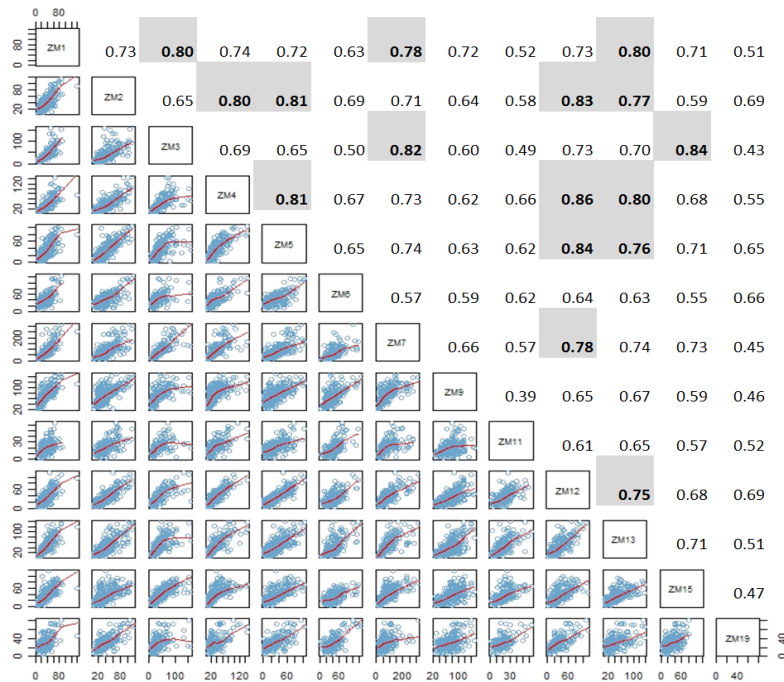


Figura 208 Correlación estaciones de PM_{10} Periodo 2

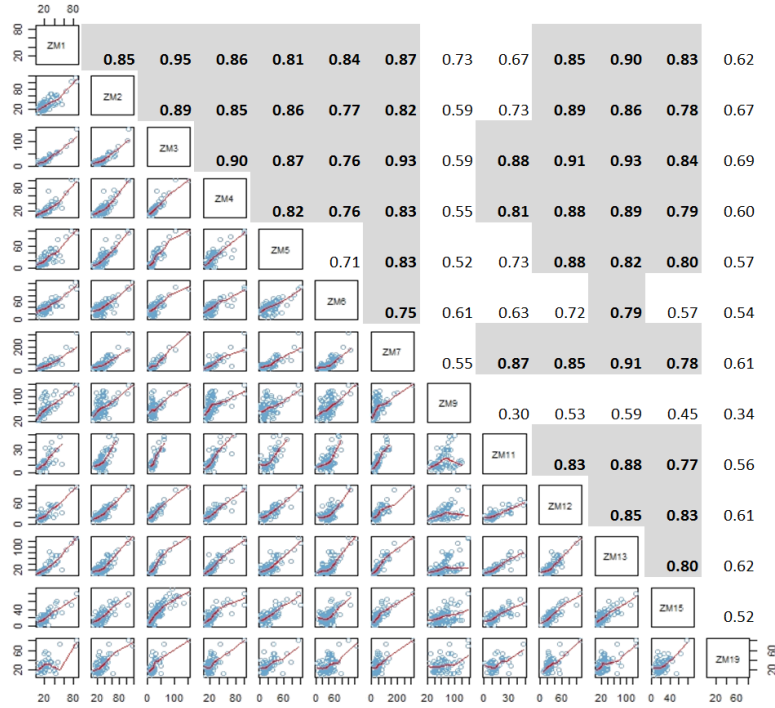


Figura 209 Correlación estaciones de PM₁₀ Periodo 3

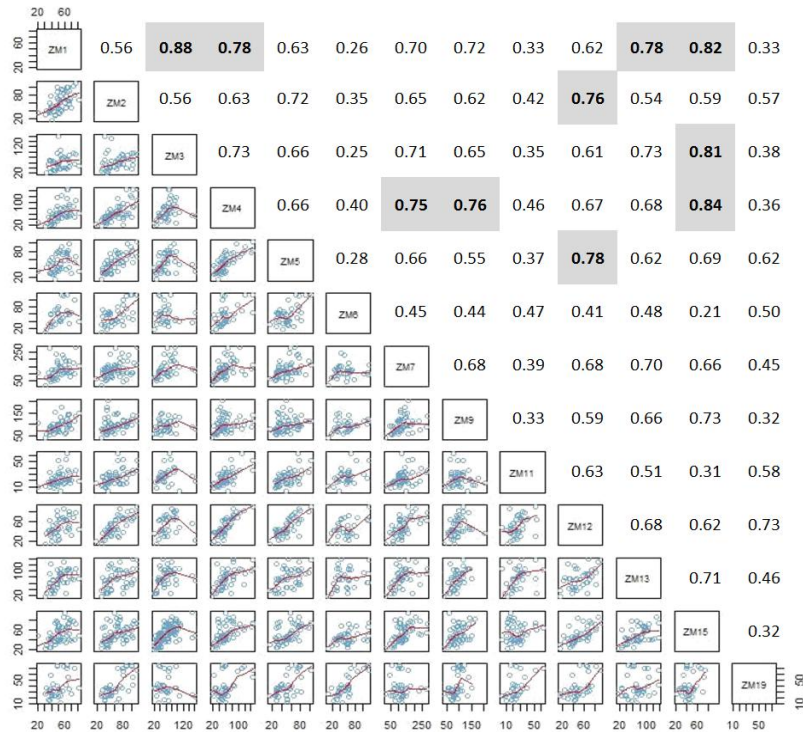


Figura 210 Correlación estaciones de PM₁₀ Periodo 4

Anexo D Relación entre precipitación y concentración de PM en una combinación de estaciones de calidad de aire con estaciones meteorológica.

D1 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales y precipitación acumulada.

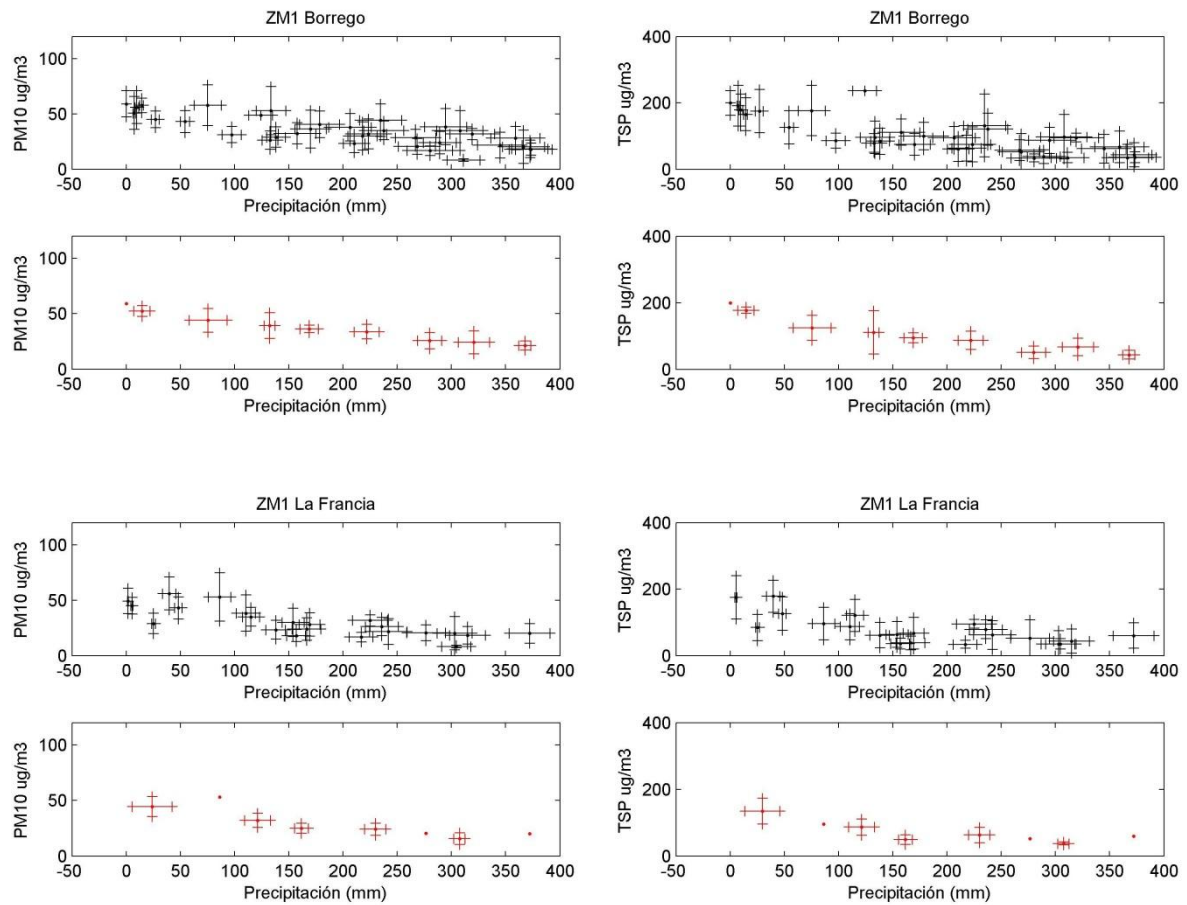


Figura 211 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM1

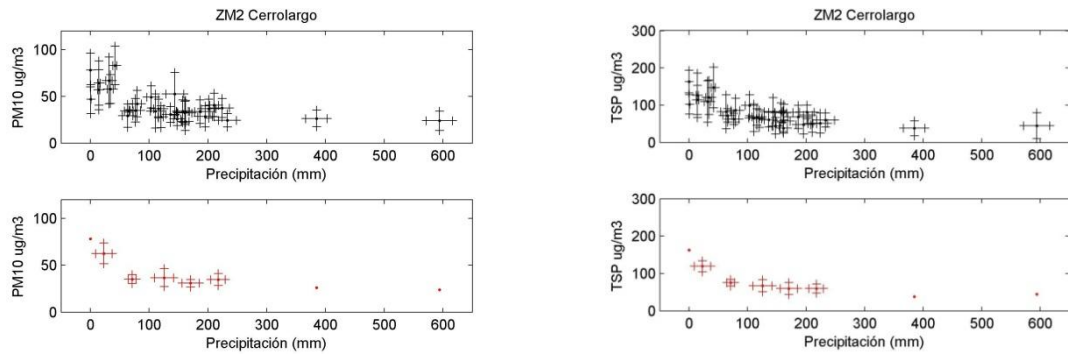


Figura 212 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM2

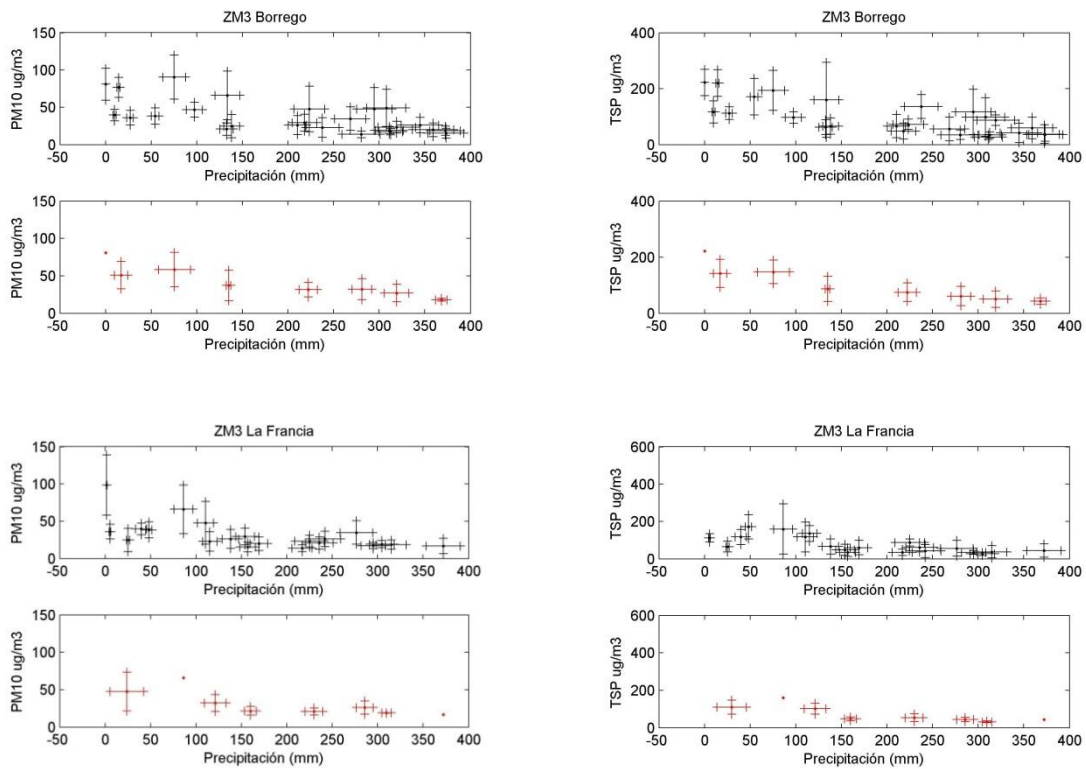


Figura 213 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM3

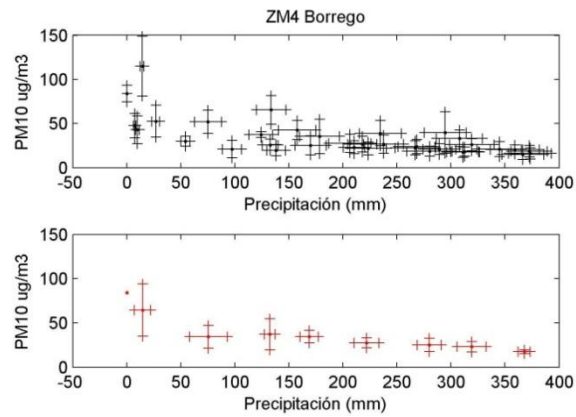


Figura 214 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM4

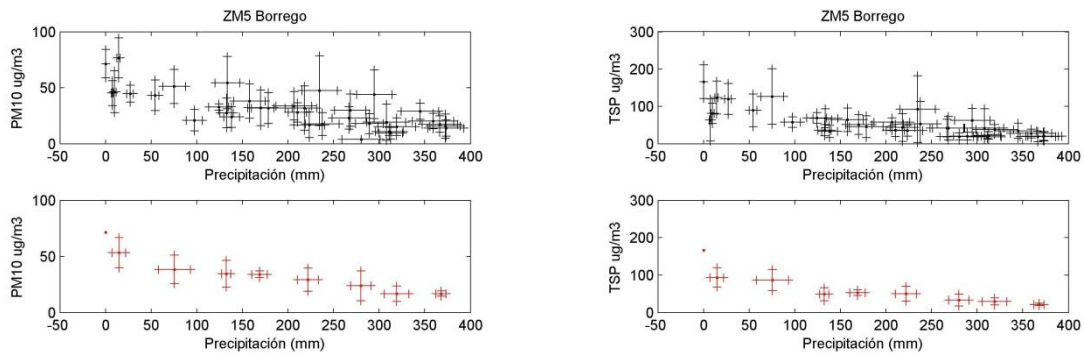


Figura 215 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM5

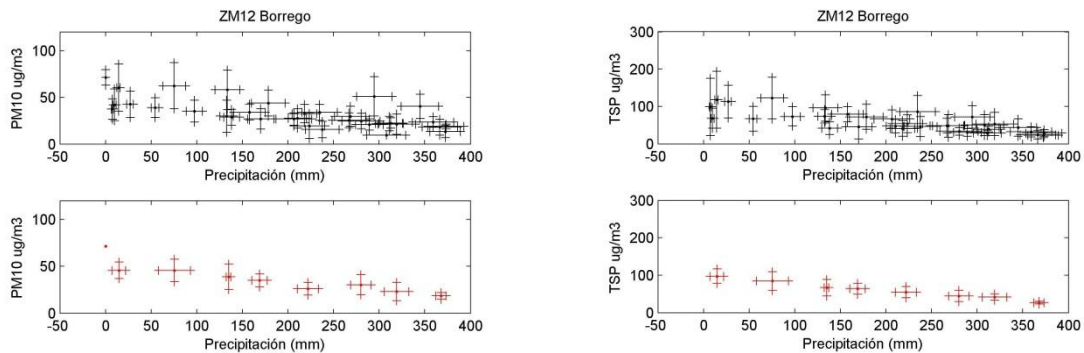


Figura 216 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM12

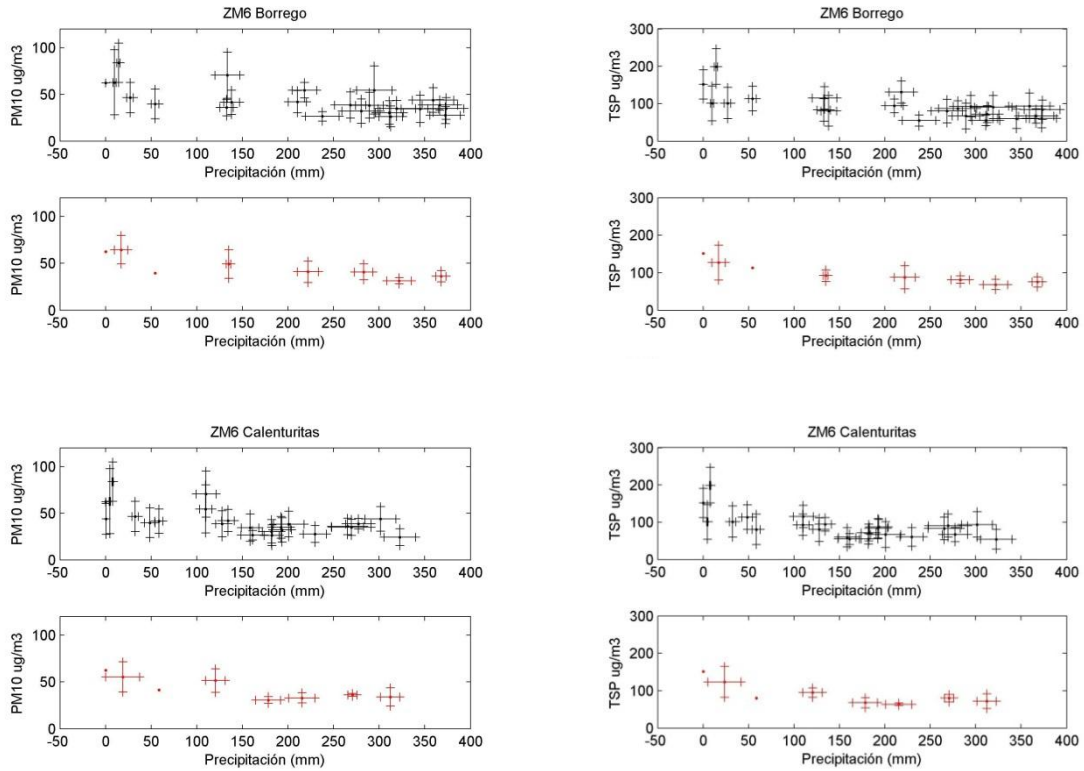


Figura 217 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM6

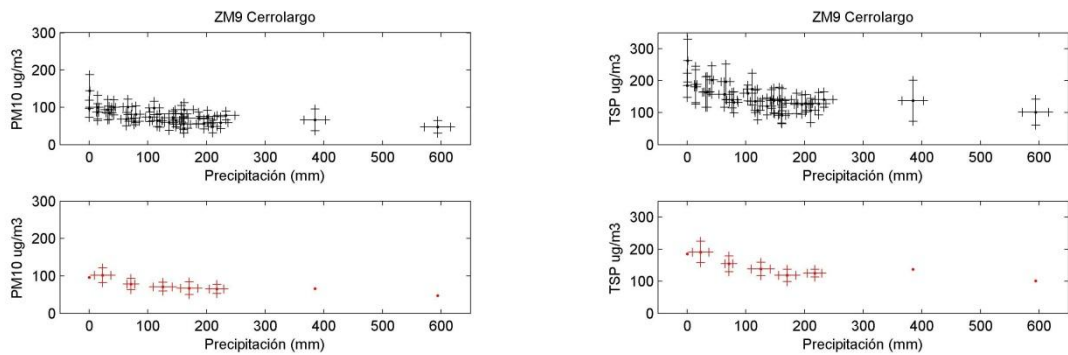


Figura 218 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM9

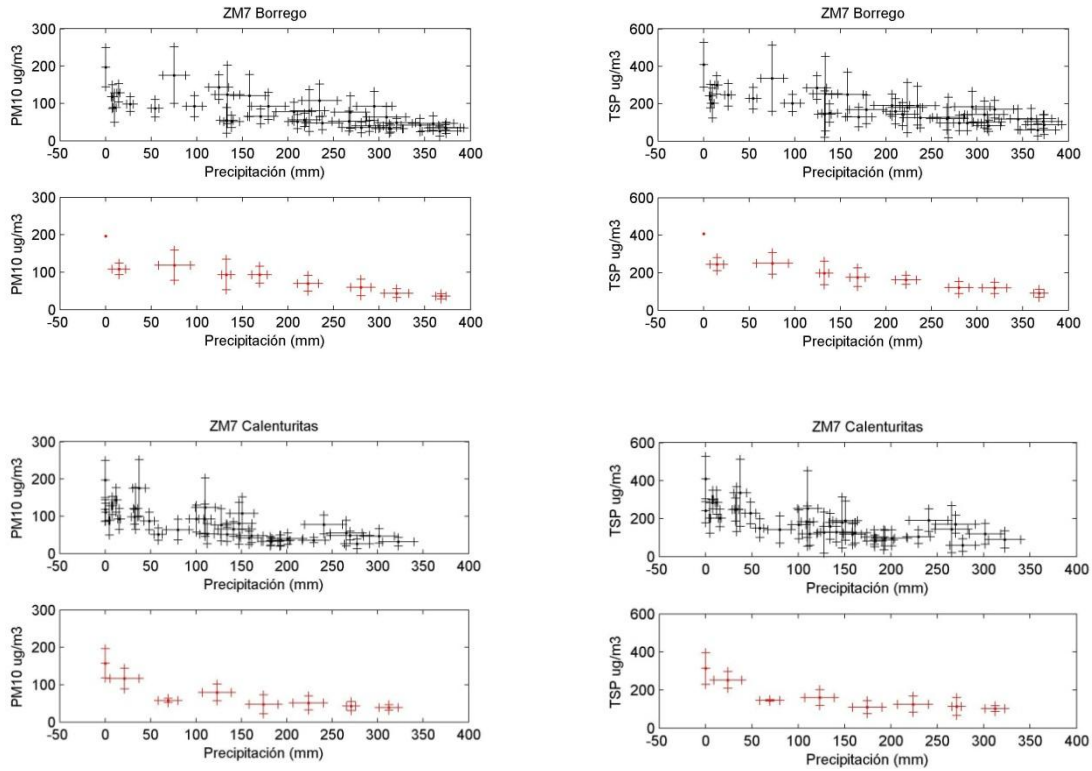


Figura 219 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM7

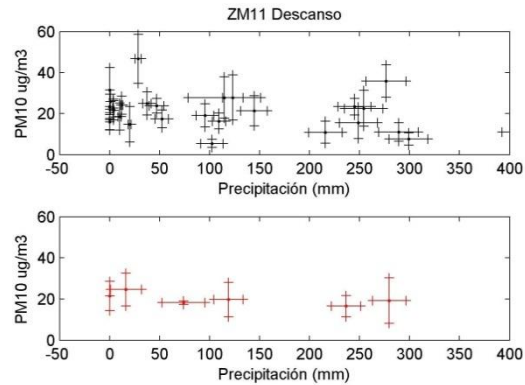


Figura 220 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM11

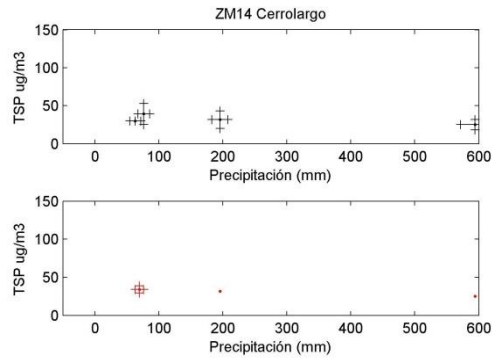


Figura 221 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM14

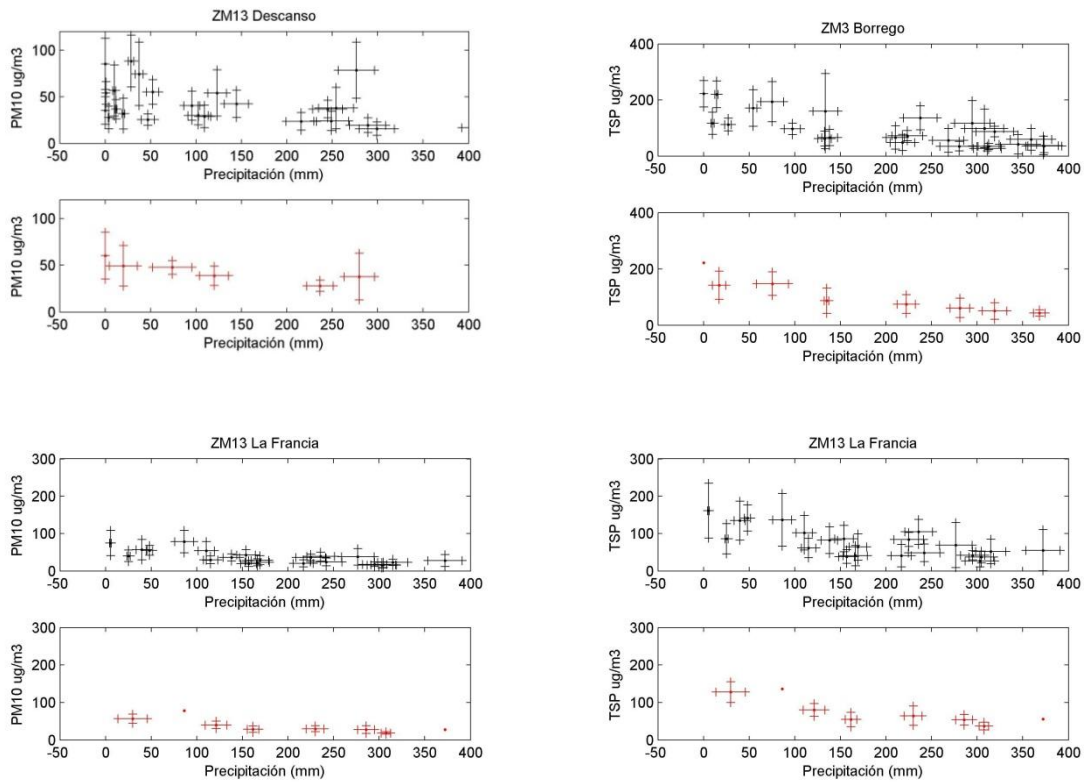


Figura 222 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM13

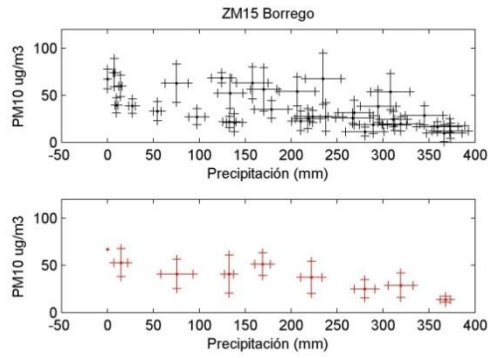


Figura 223 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM15

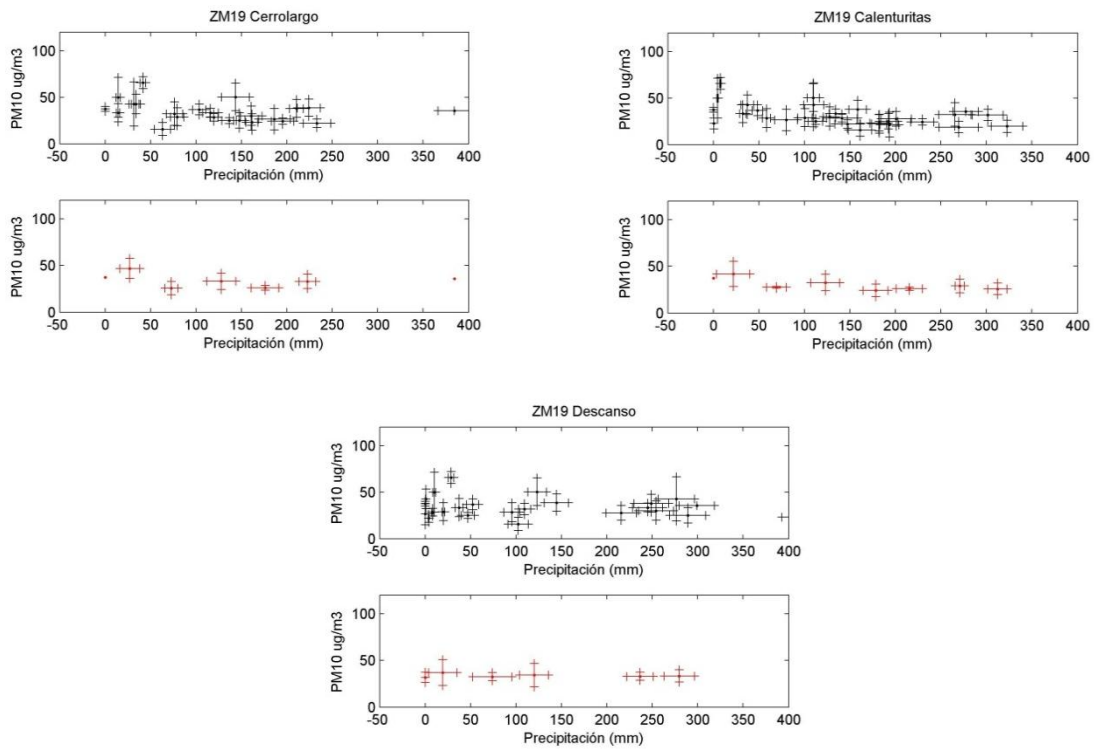


Figura 224 Comportamiento de concentraciones promedio mensuales vs. Precipitación acumulada estación ZM19

D2 Desarrollo del modelo matemático de deposición húmeda

$$\frac{dC}{dt} = -\Lambda t, \text{ Sabine Banzhaf - 2009}$$

$$\int_{C_i}^C dC = -\Lambda \int_0^t dt \quad (\Lambda \text{ no varía en el tiempo cuando } t \text{ está entre } 0 \text{ y } t)$$

$$\ln\left(\frac{C}{C_i}\right) = -\Lambda t$$

$$C = C_i e^{-\Lambda t}$$

$$\Lambda = \alpha R \quad (R \text{ no varía en el tiempo cuando } t \text{ está entre } 0 \text{ y } t)$$

$$C = C_i e^{-\alpha R t}$$

$$\bar{C} = \frac{\int_0^{t^*} C dt}{t^*} = \frac{C_i}{t^*} * \int_0^{t^*} e^{-\alpha R t} dt$$

(\bar{R} es la tasa de precipitación promedio entre el tiempo 0 y el tiempo t^*)

$$x = -\alpha \bar{R} t$$

$$dx = -\alpha \bar{R} dt; \quad dt = \frac{dx}{-\alpha \bar{R}}$$

$$\bar{C} = \frac{C_i}{t^*} * \int_0^{t^*} \frac{e^x dx}{-\alpha \bar{R}} = \frac{C_i}{-\alpha \bar{R} t^*} * \int_0^{t^*} e^x dx = \frac{C_i}{-\alpha \bar{R} t^*} * (e^{-\alpha \bar{R} t^*} - e^{-\alpha \bar{R} * 0})$$

$$\bar{C} = \frac{C_i}{\alpha \bar{R} t^*} * (1 - e^{-\alpha \bar{R} t^*})$$

$$\bar{R}t^* = R_{ac}$$

$$\bar{C} = \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} * (1 - e^{-\alpha R_{ac}}) + C_o$$

$$R_{ac} = \frac{1}{\alpha}$$

$$\bar{C} = \frac{C_i}{\alpha \frac{1}{\alpha}} * \left(1 - e^{-\alpha \frac{1}{\alpha}}\right) + C_o = C_i \left(1 - \frac{1}{e}\right) + C_o = 0.63 C_i + C_o$$

$$R_{ac} \rightarrow 0$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \bar{C} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} (1 - e^{-\alpha R_{ac}}) + \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} C_o$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \bar{C} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} - \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} e^{-\alpha R_{ac}} + C_o$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} - \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} e^{-\alpha R_{ac}} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{\frac{\alpha R_{ac} e^{\alpha R_{ac}}}{C_i} - \frac{\alpha R_{ac}}{C_i}}{\frac{\alpha^2 R_{ac}^2 e^{\alpha R_{ac}}}{C_i^2}} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i (e^{\alpha R_{ac}} - 1)}{\alpha R_{ac} e^{\alpha R_{ac}}}$$

$$= 0/0$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i (e^{\alpha R_{ac}} - 1)}{\alpha R_{ac} e^{\alpha R_{ac}}} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{f(R_{ac})}{g(R_{ac})} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{f'(R_{ac})}{g'(R_{ac})}$$

$$f(R_{ac}) = C_i (e^{\alpha R_{ac}} - 1)$$

$$g(R_{ac}) = \alpha R_{ac} e^{\alpha R_{ac}}$$

$$f'(R_{ac}) = \alpha C_i e^{\alpha R_{ac}}$$

$$g'(R_{ac}) = \alpha e^{\alpha R_{ac}} + \alpha^2 R_{ac} e^{\alpha R_{ac}}$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} \frac{(e^{\alpha R_{ac}} - 1)}{e^{\alpha R_{ac}}} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{\alpha C_i e^{\alpha R_{ac}}}{\alpha e^{\alpha R_{ac}} + \alpha^2 R_{ac} e^{\alpha R_{ac}}} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{\alpha C_i e^{\alpha R_{ac}}}{\alpha e^{\alpha R_{ac}} (1 + \alpha R_{ac})}$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} \frac{(e^{\alpha R_{ac}} - 1)}{e^{\alpha R_{ac}}} = \lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \frac{C_i}{(1 + \alpha R_{ac})} = C_i$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow 0} \bar{C} = C_i + C_o$$

$$R_{ac} \rightarrow \infty$$

$$\lim_{R_{ac} \rightarrow \infty} \bar{C} = \lim_{R_{ac} \rightarrow \infty} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} - \lim_{R_{ac} \rightarrow \infty} \frac{C_i}{\alpha R_{ac}} e^{-\alpha R_{ac}} + C_o = C_o$$

D3 Gráficos para el modelo de deposición húmeda de PM10

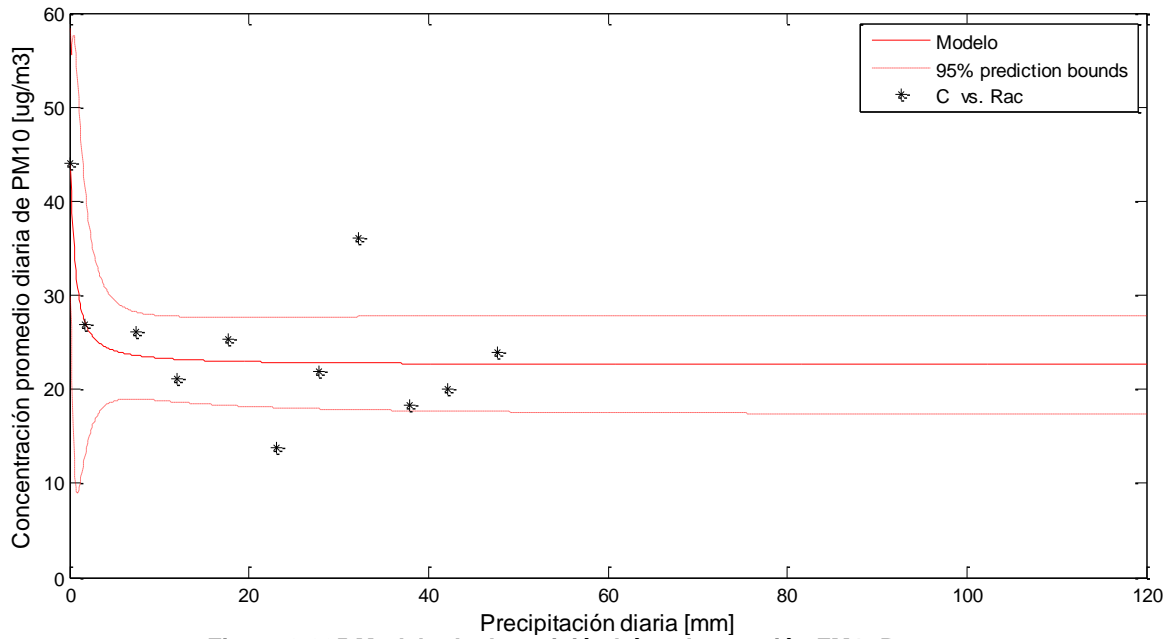


Figura 8-225 Modelo de deposición húmeda estación ZM1 -Borrego

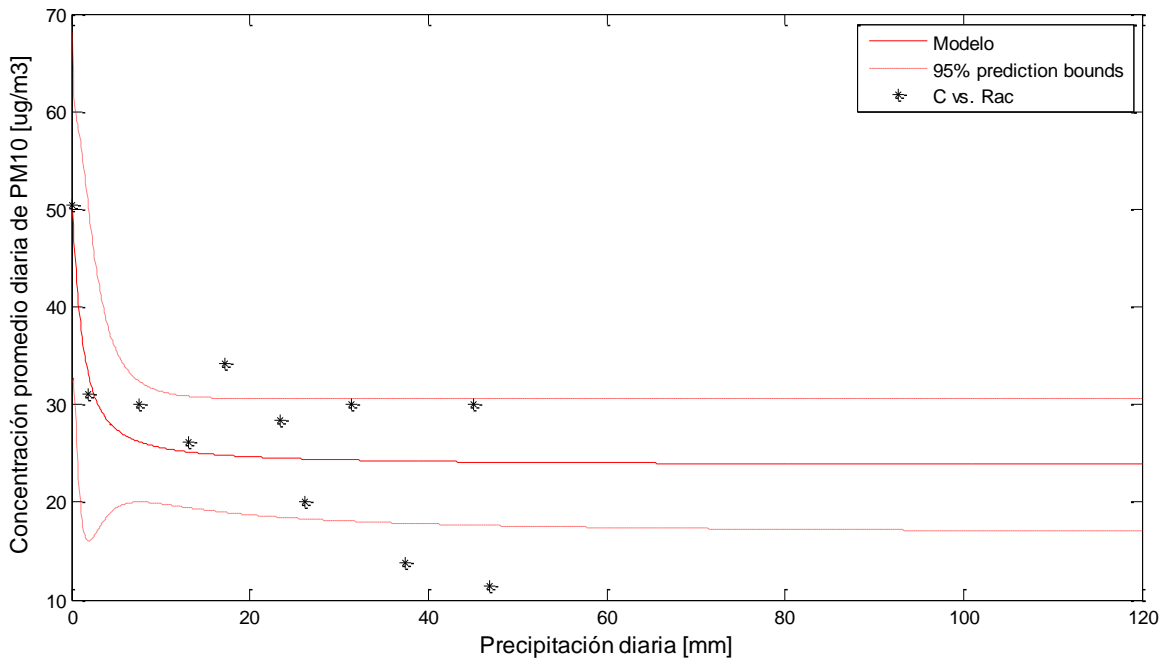


Figura 226 Modelo de deposición húmeda estación ZM2 – Cerrolargo

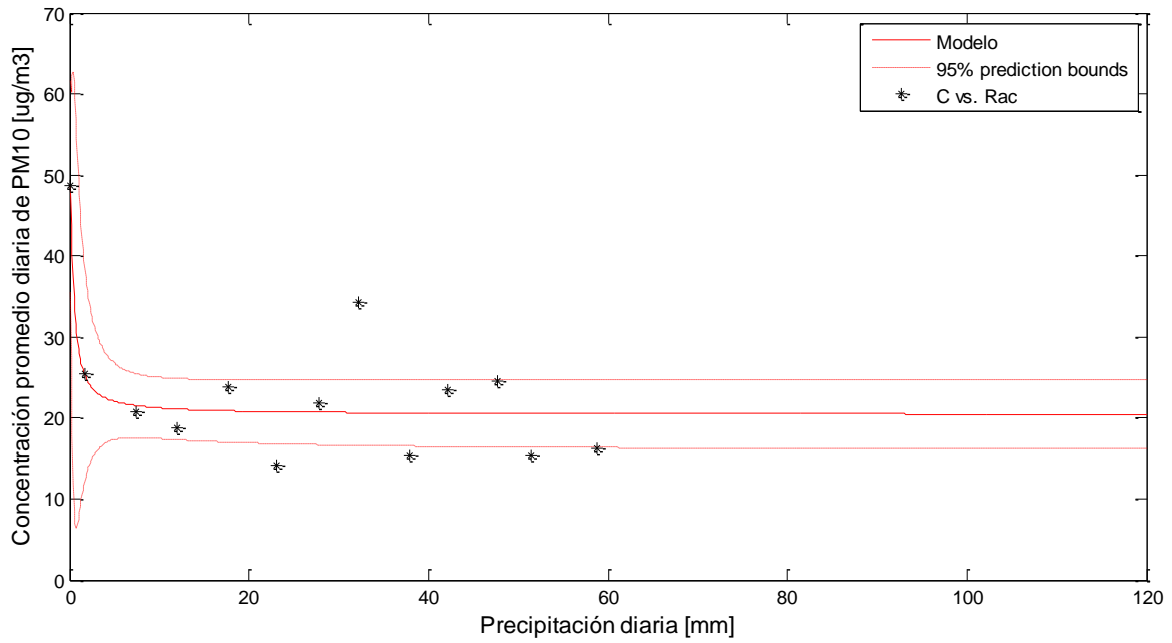


Figura 227 Modelo de deposición húmeda estación ZM3 - Borrego

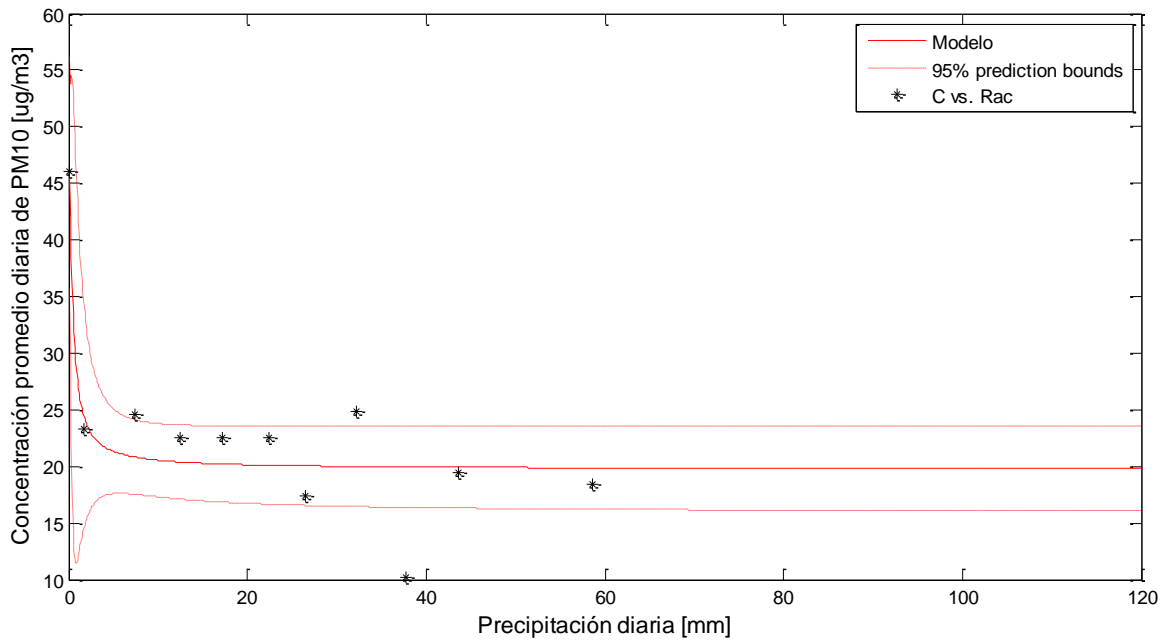


Figura 228 Modelo de deposición húmeda estación ZM4 - Cerrolargo

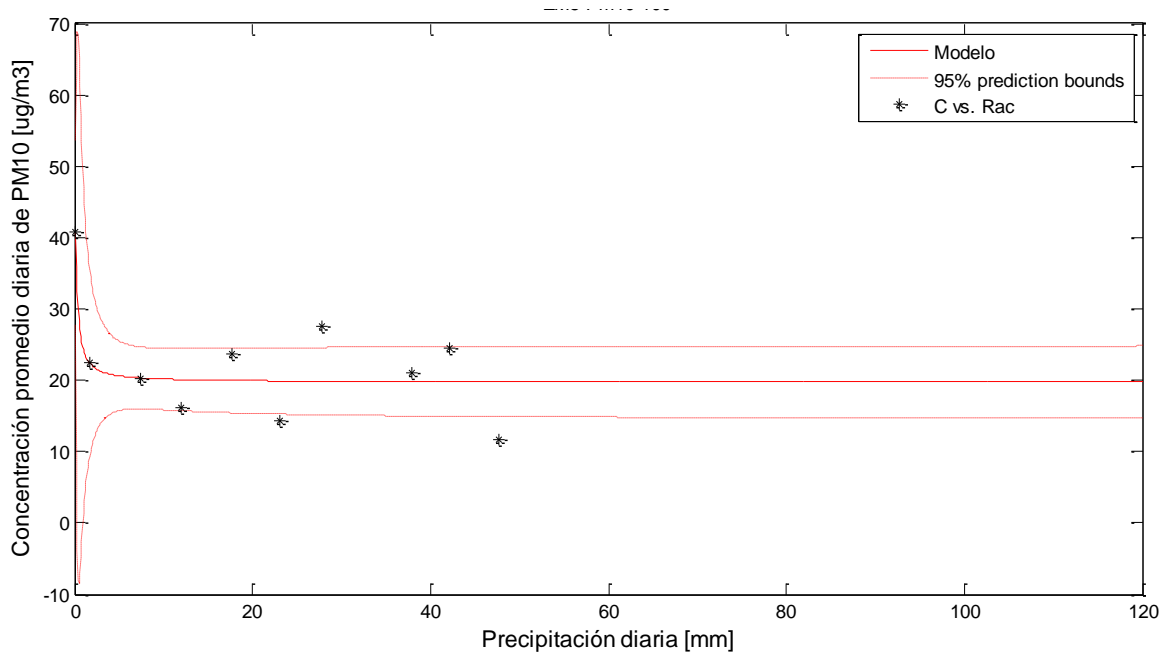


Figura 229 Modelo de deposición húmeda estación ZM5 - Borrego

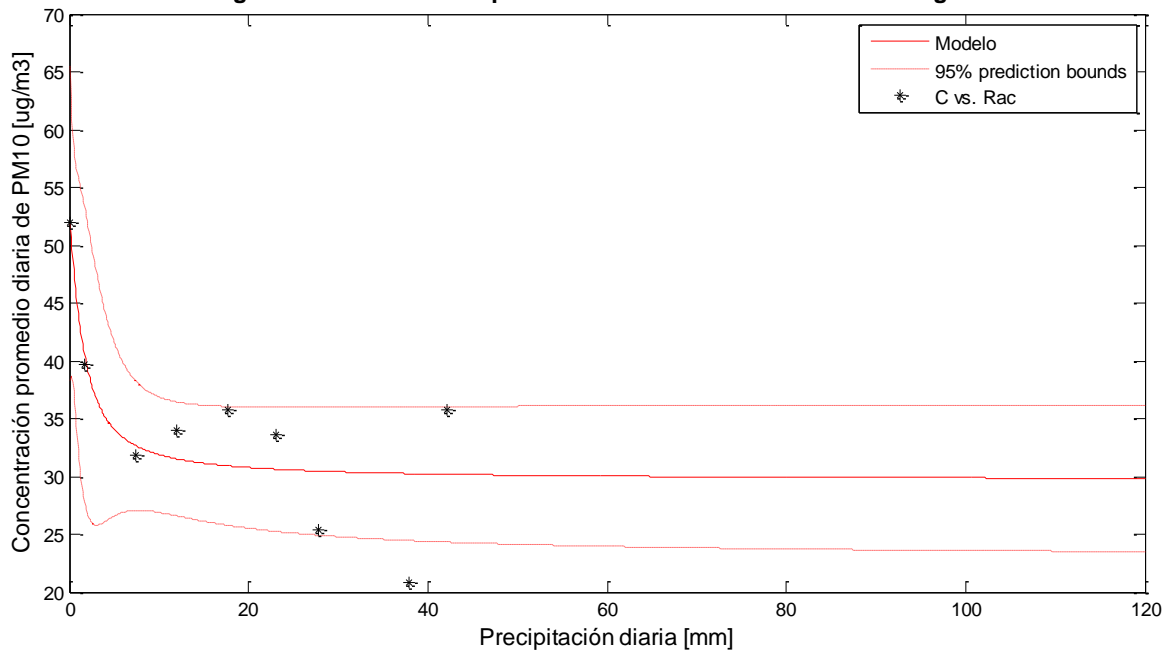


Figura 230 Modelo de deposición húmeda estación ZM6 - Borrego

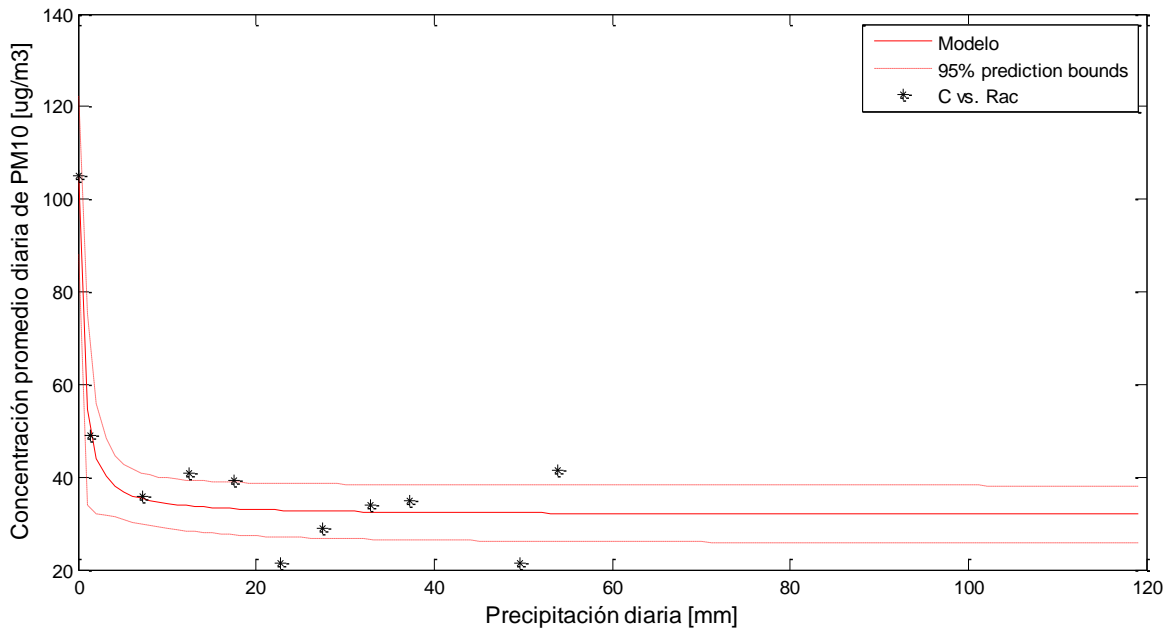


Figura 231 Modelo de deposición húmeda estación ZM7 - Calenturitas

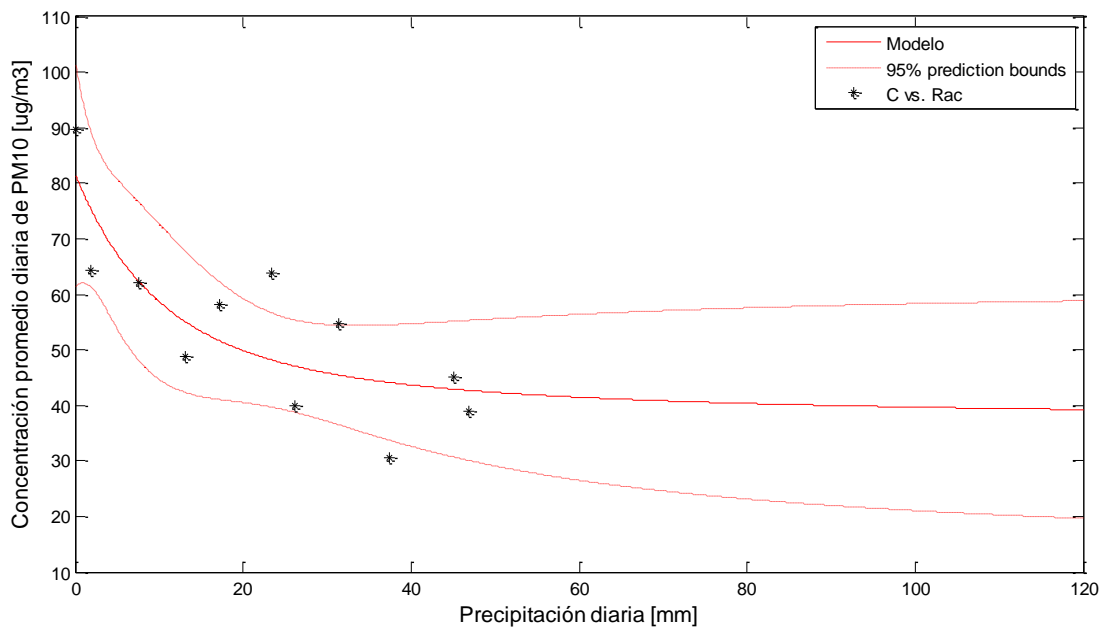


Figura 232 Modelo de deposición húmeda estación ZM9 - Cerrolargo

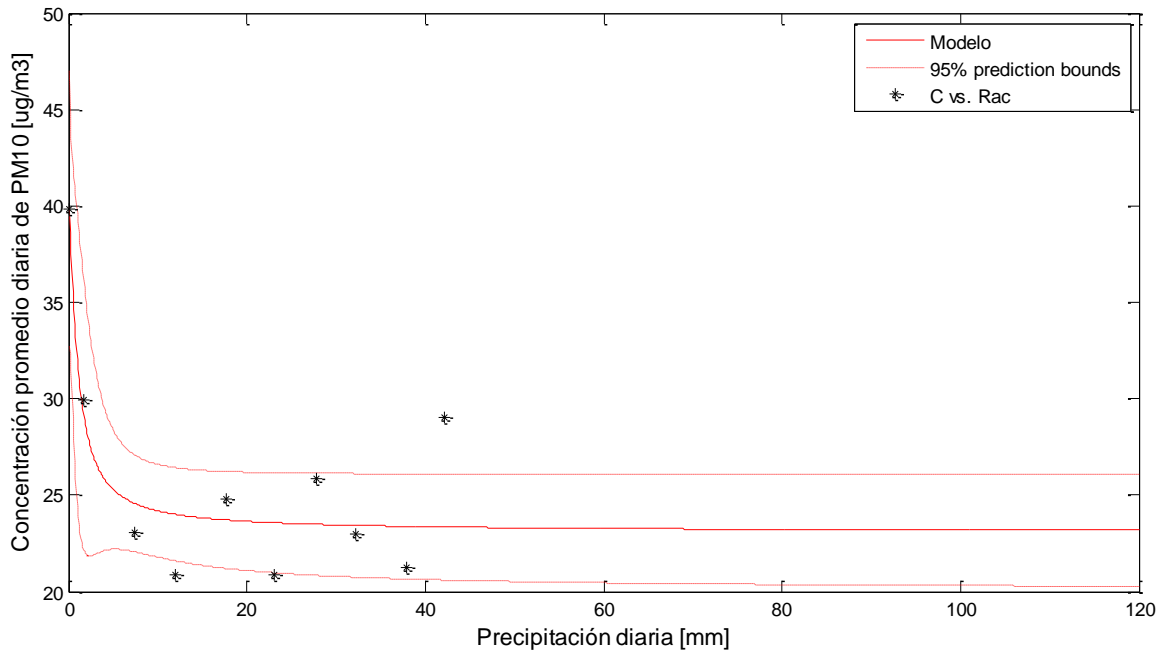


Figura 233 Modelo de deposición húmeda estación ZM12 - Borrego

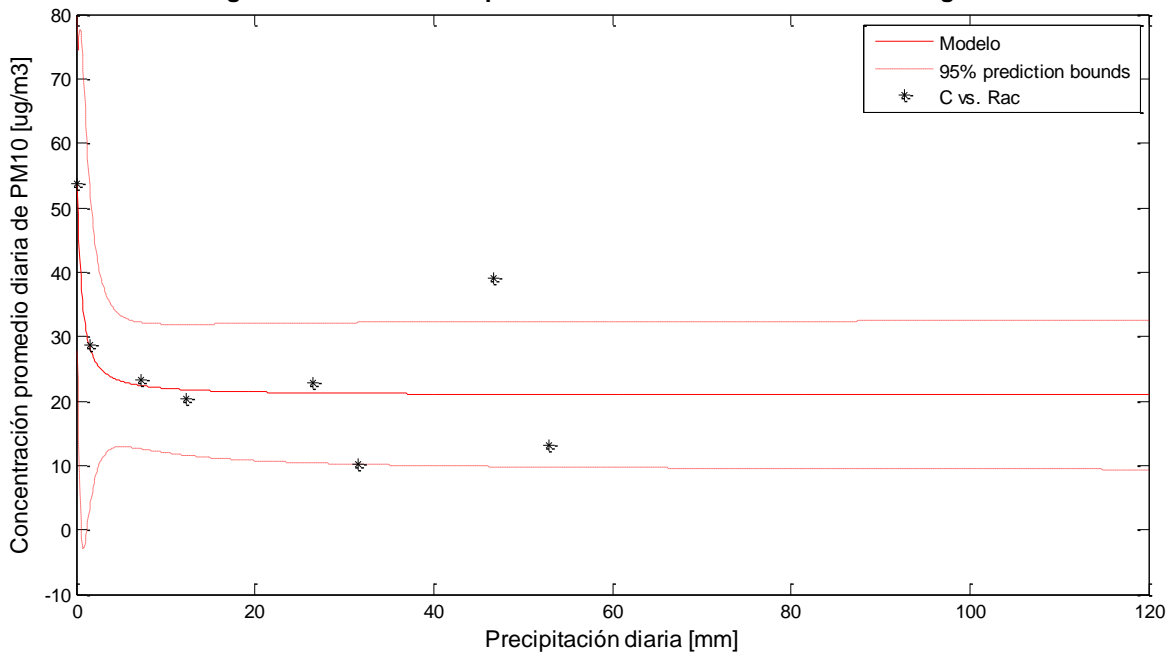


Figura 234 Modelo de deposición húmeda estación ZM13 – Descanso

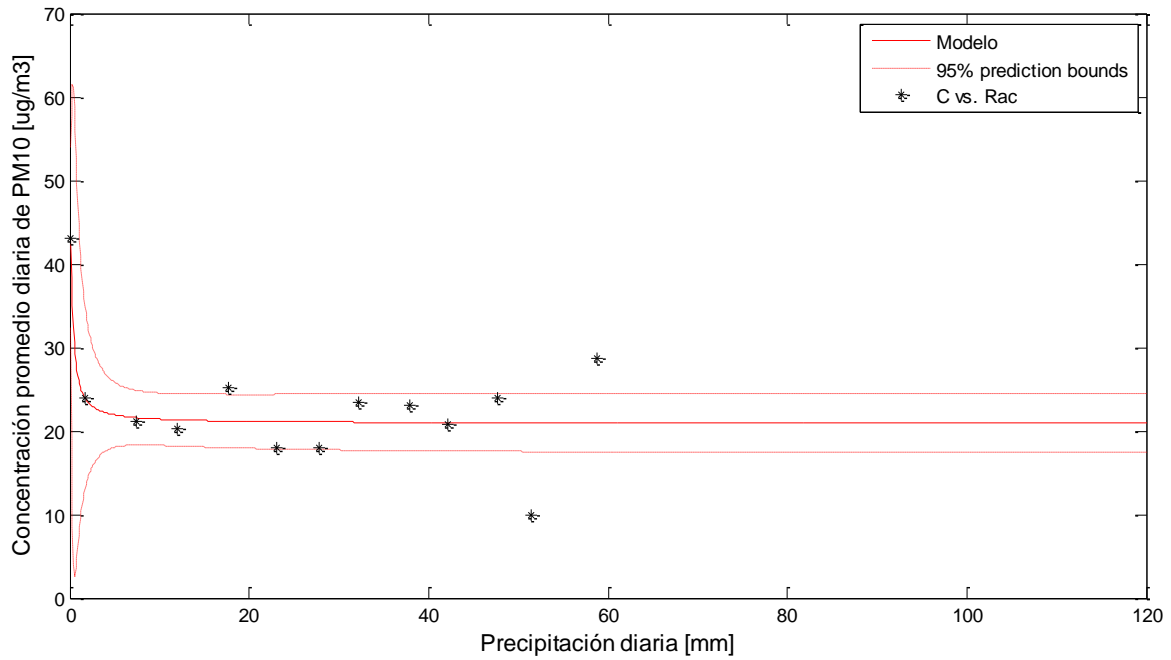


Figura 235 Modelo de deposición húmeda estación ZM15 - Borrego

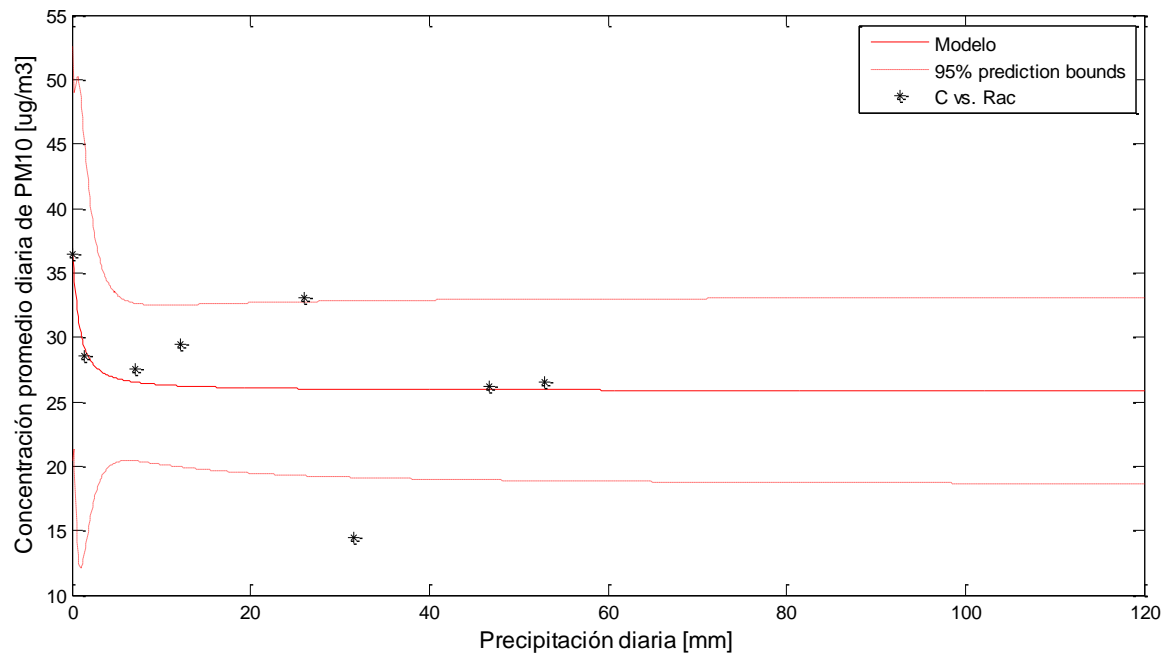


Figura 236 Modelo de deposición húmeda estación ZM19 - Descanso

D4 Gráficos para el modelo de deposición húmeda de TSP

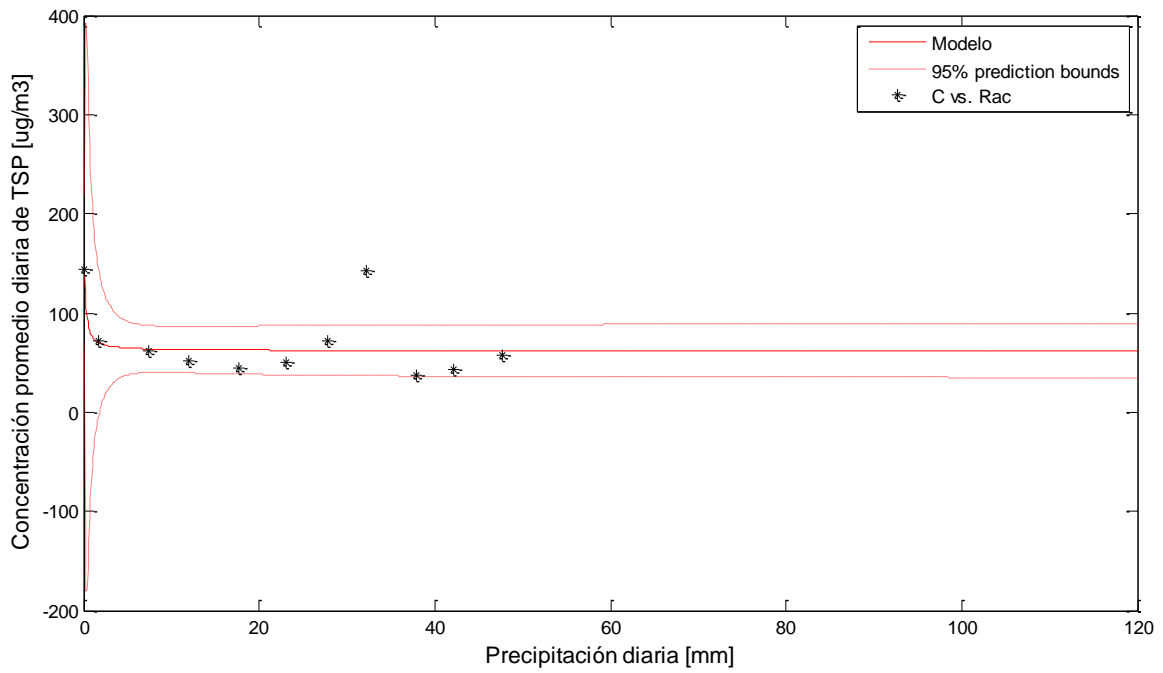


Figura 237 Modelo de deposición húmeda estación ZM1 – Borrego

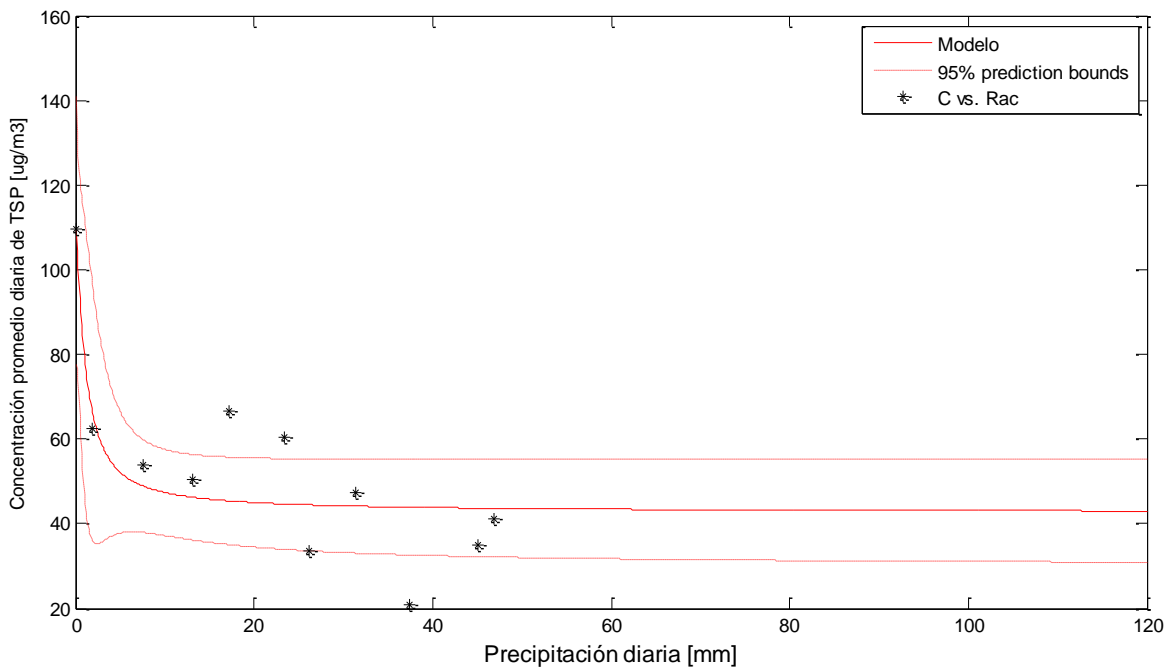


Figura 238 Modelo de deposición húmeda estación ZM2 – Cerrolargo

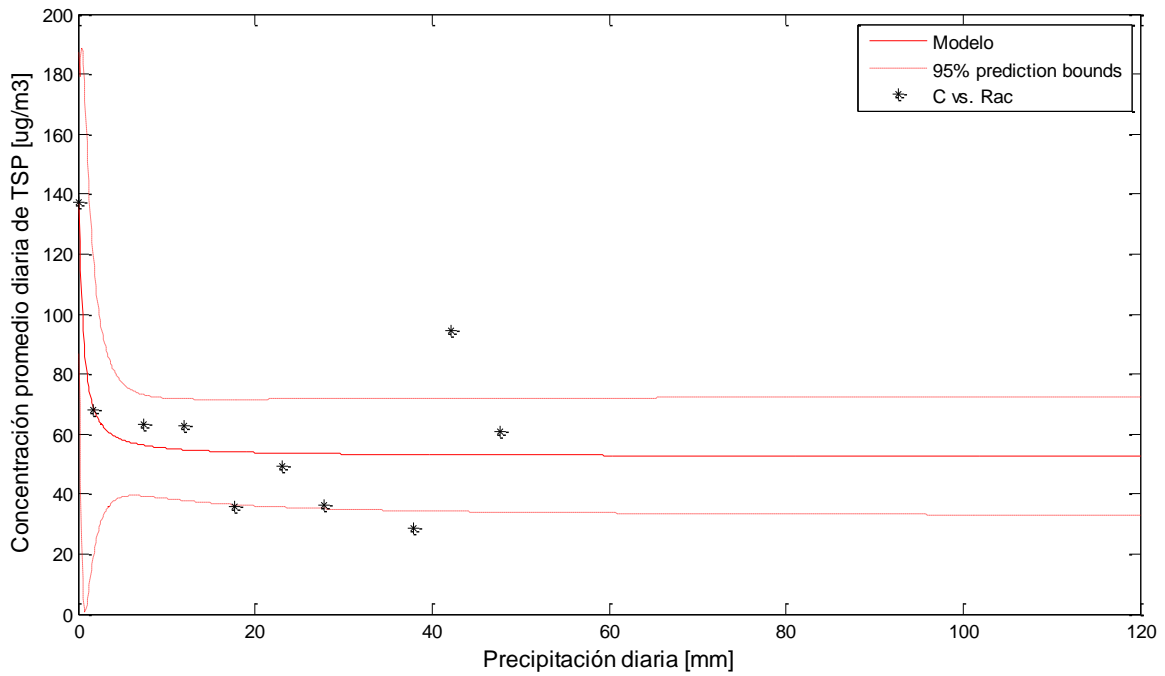


Figura 239 Modelo de deposición húmeda estación ZM3 – Borrego

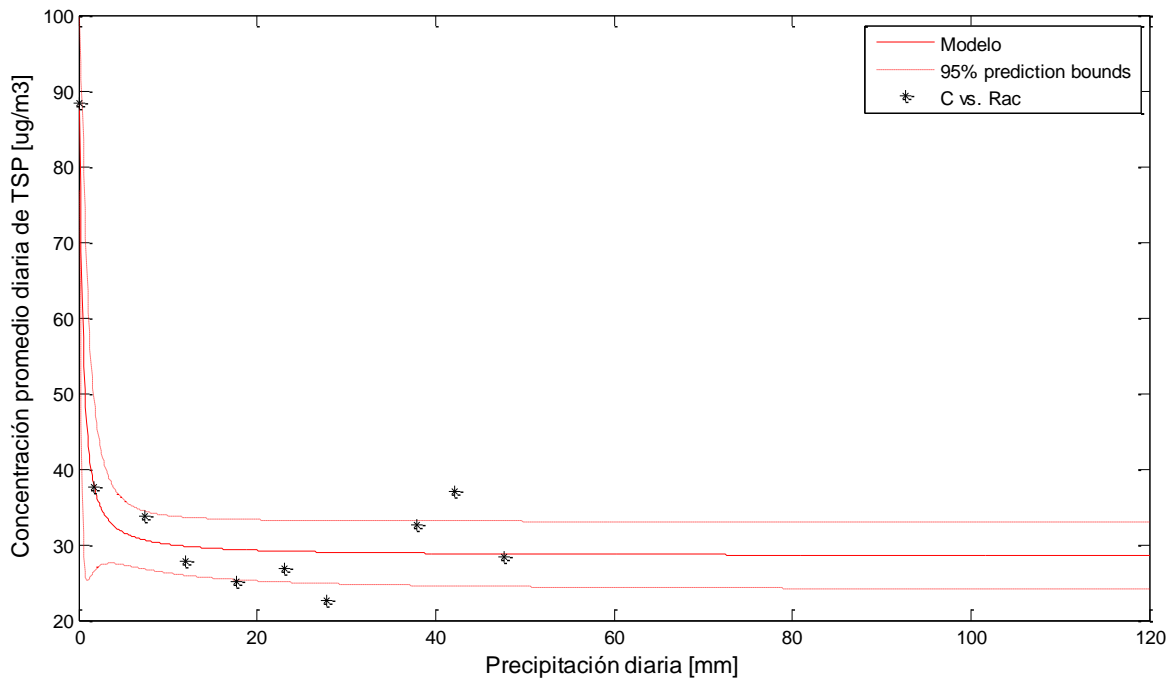


Figura 240 Modelo de deposición húmeda estación ZM5 – Borrego

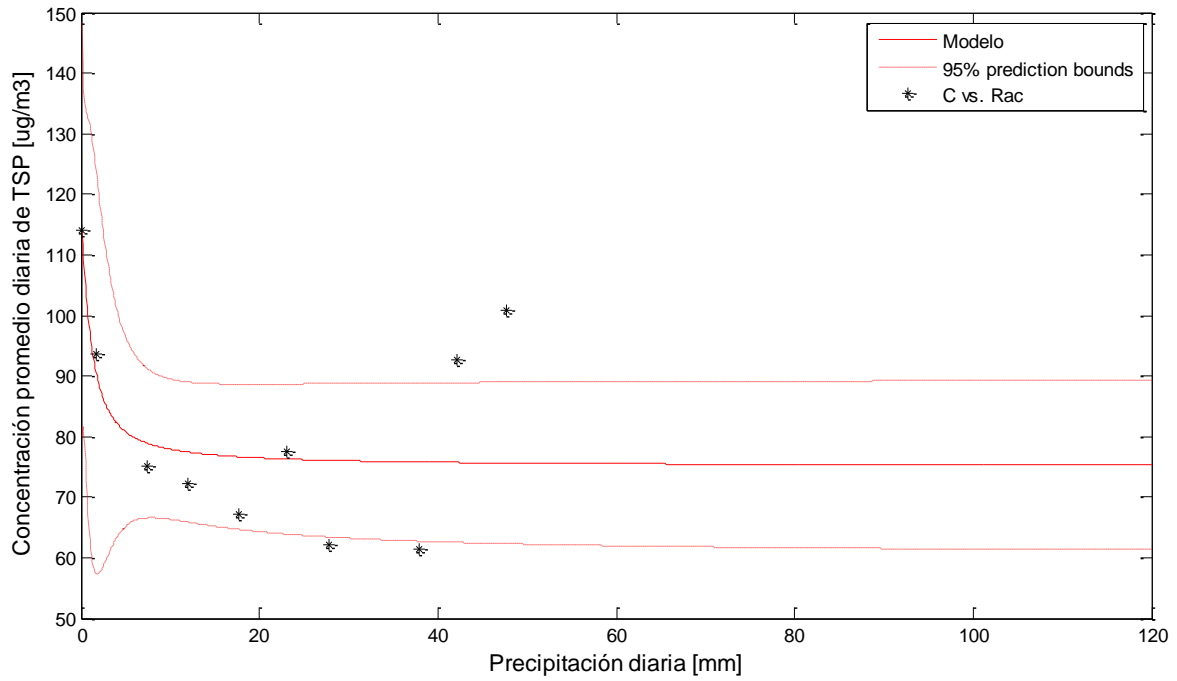


Figura 241 Modelo de deposición húmeda estación ZM6 - Borrego

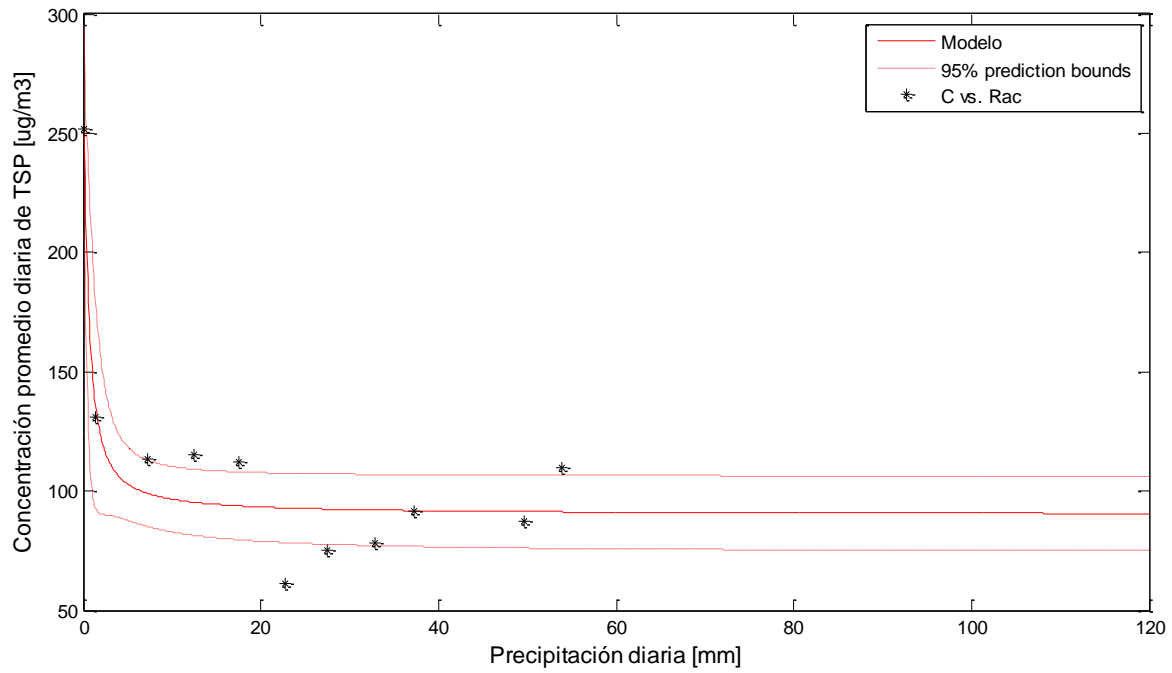


Figura 242 Modelo de deposición húmeda estación ZM7 - Calenturitas

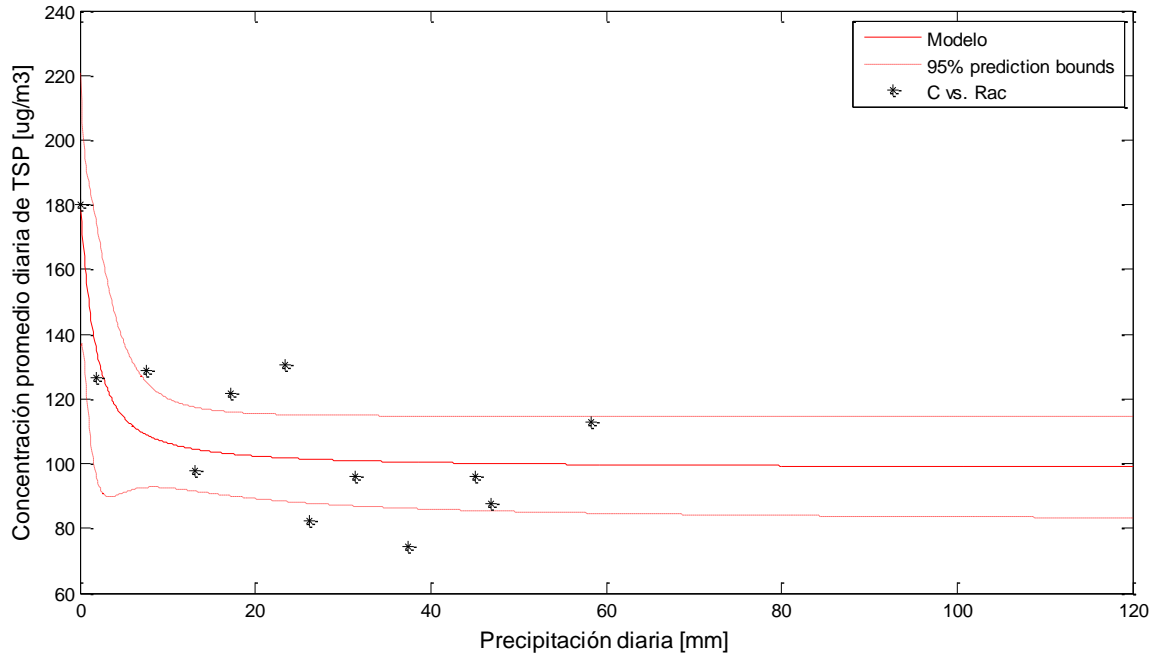


Figura 243 Modelo de deposición húmeda estación ZM9 - Cerrolargo

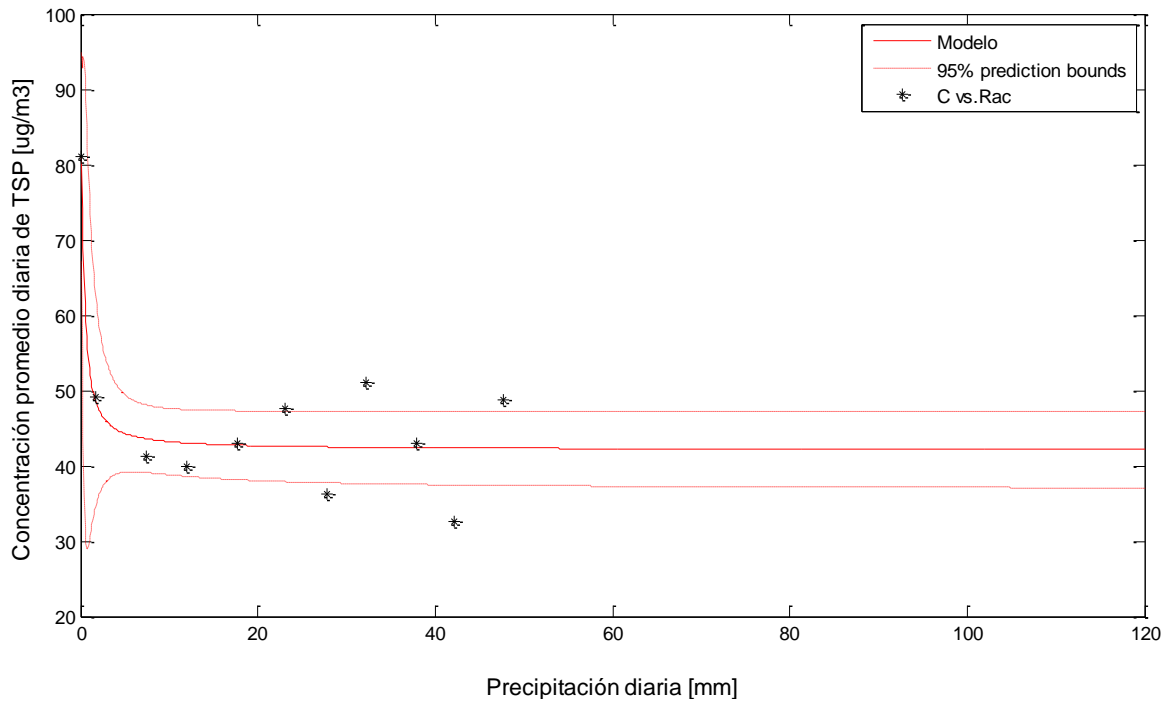


Figura 244 Modelo de deposición húmeda estación ZM12 - Borrego

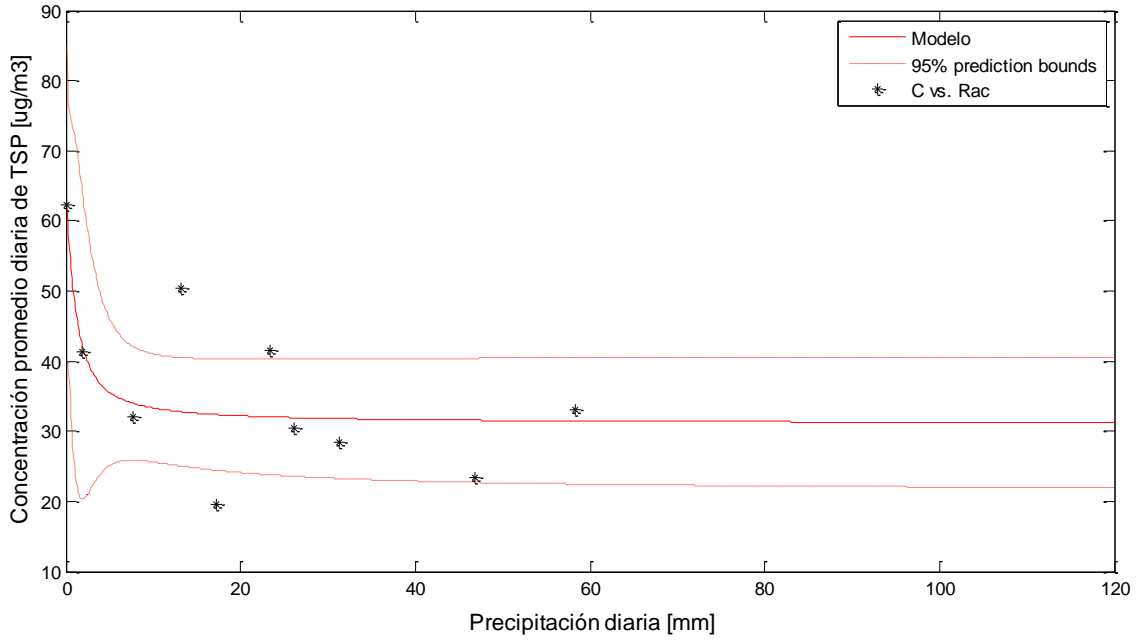


Figura 245 Modelo de deposición húmeda estación ZM14 – Cerrolargo

Anexo E

Anexo F Relación de concentración con variables meteorológicas

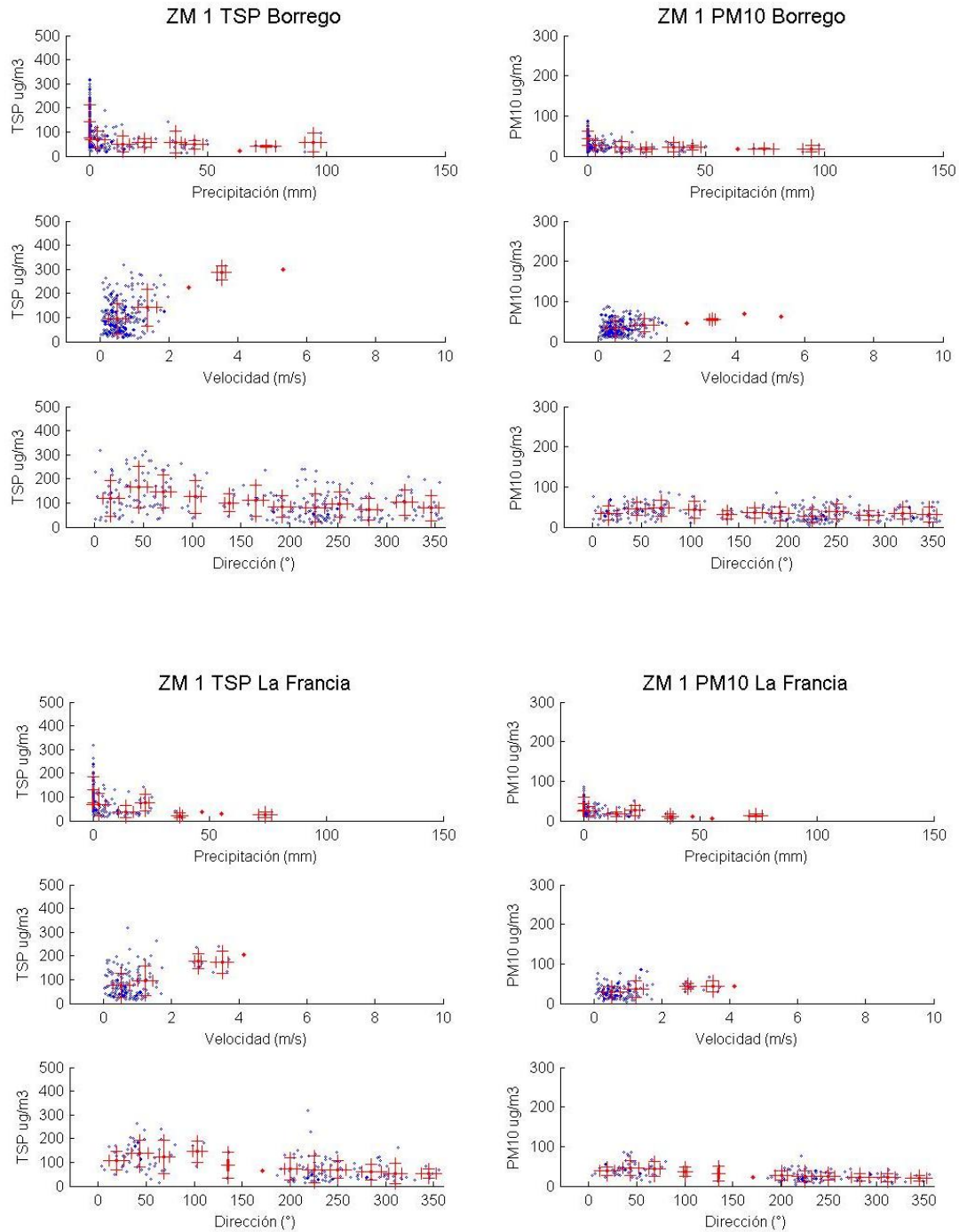


Figura 246 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1

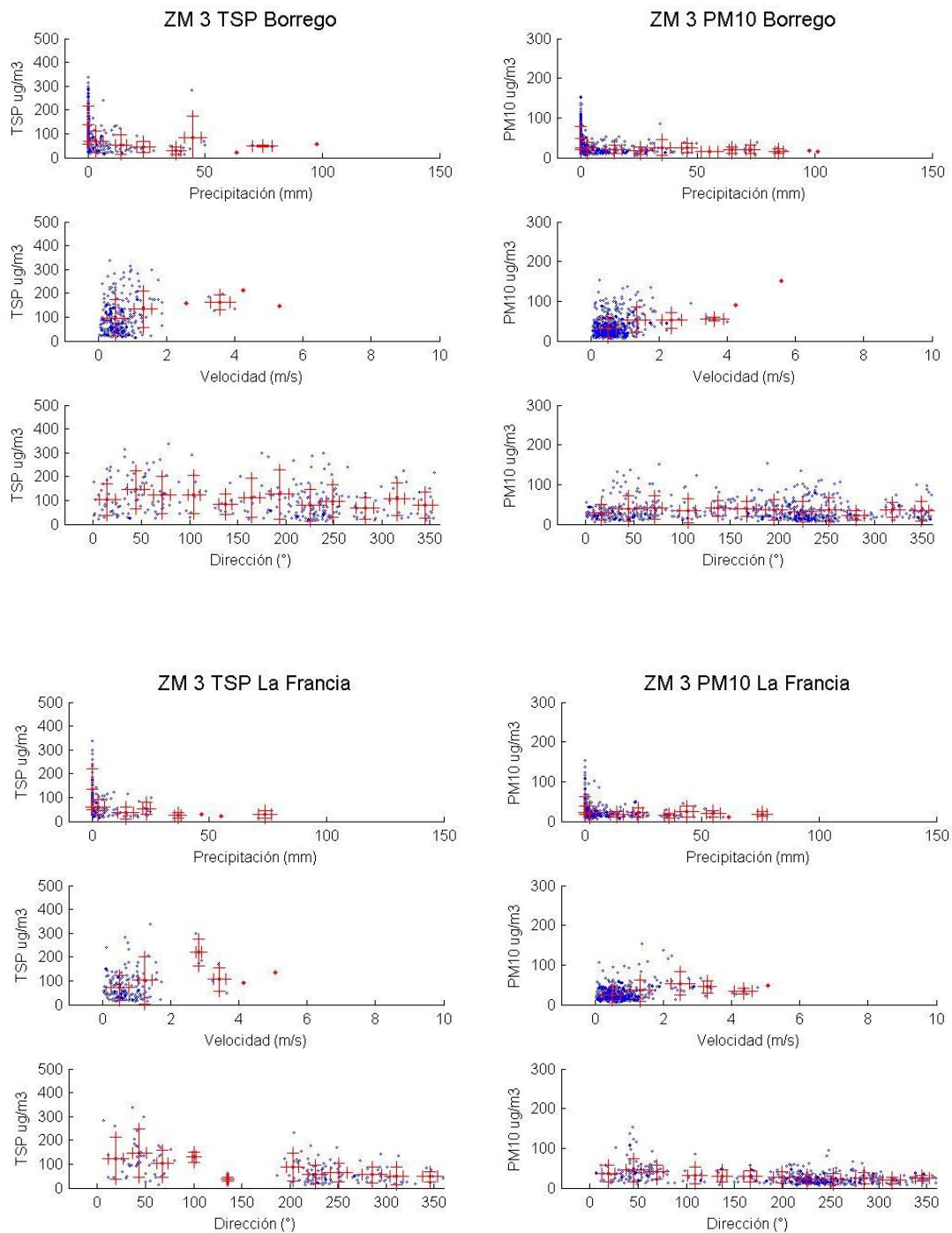


Figura 247 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3

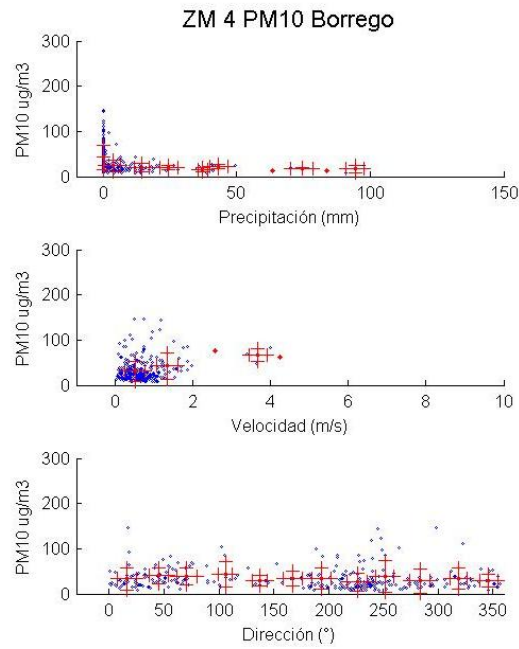


Figura 248 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4

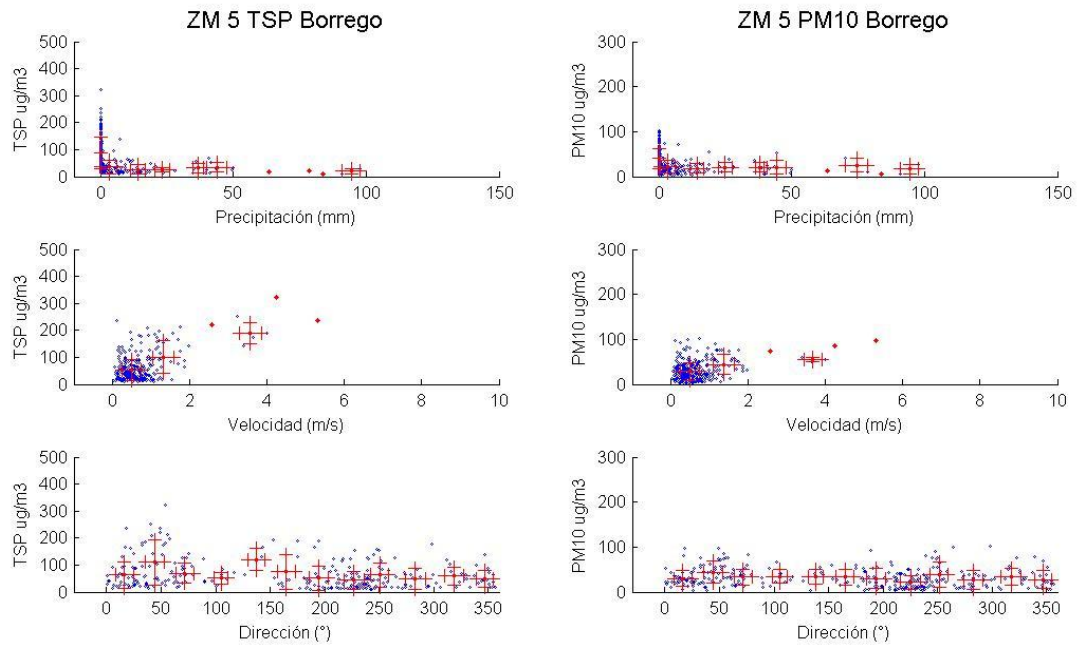


Figura 249 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5

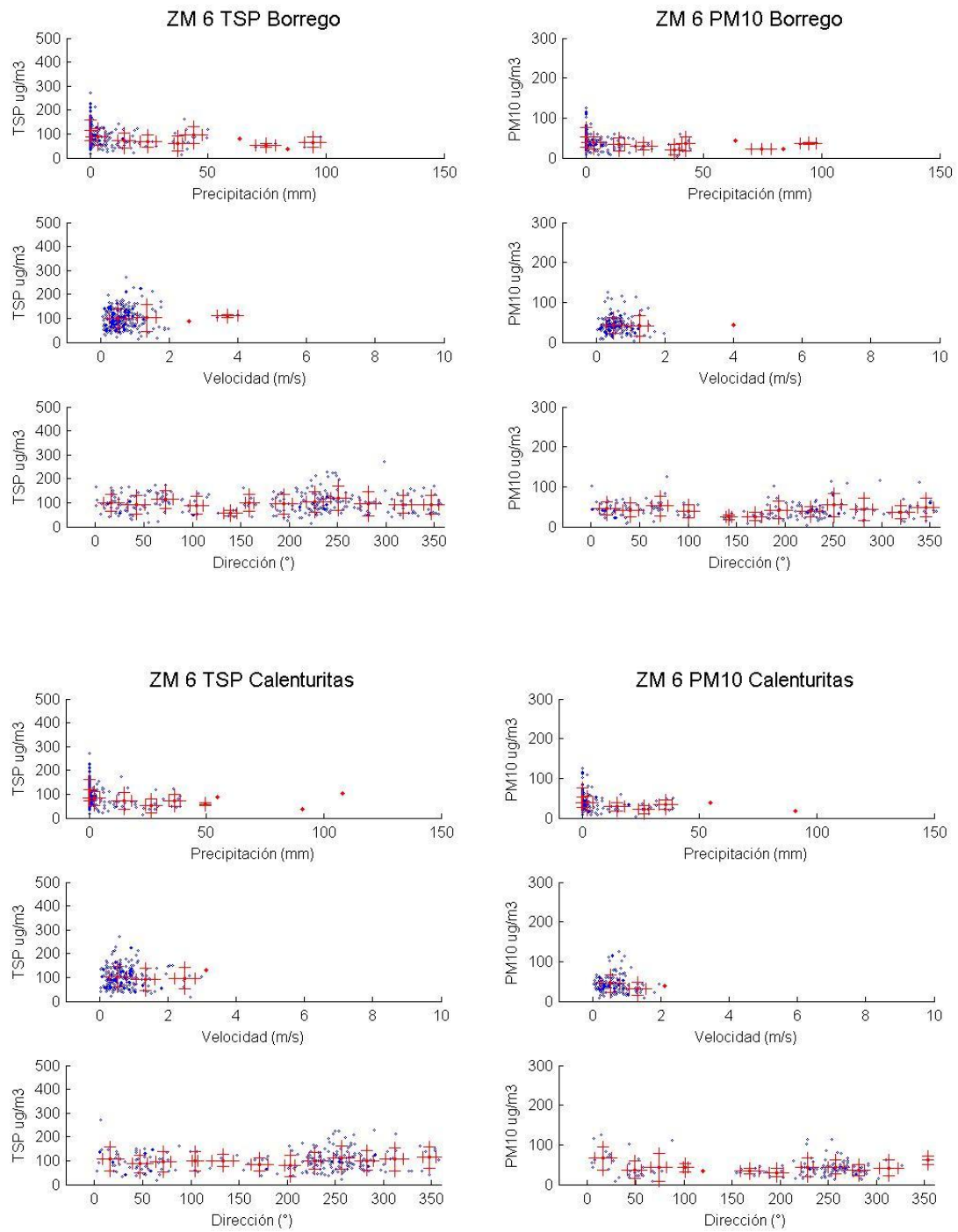


Figura 250 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6

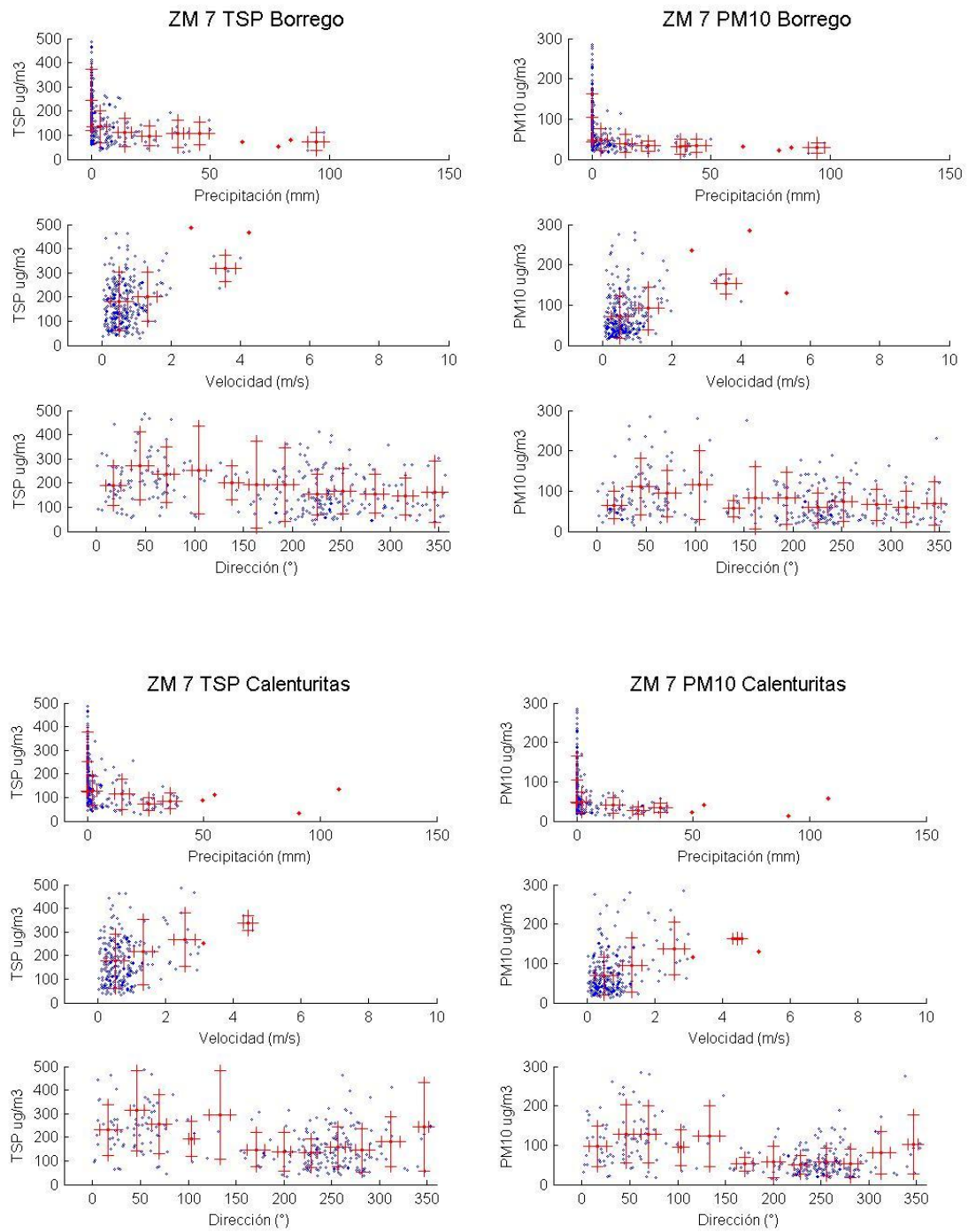


Figura 251 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7

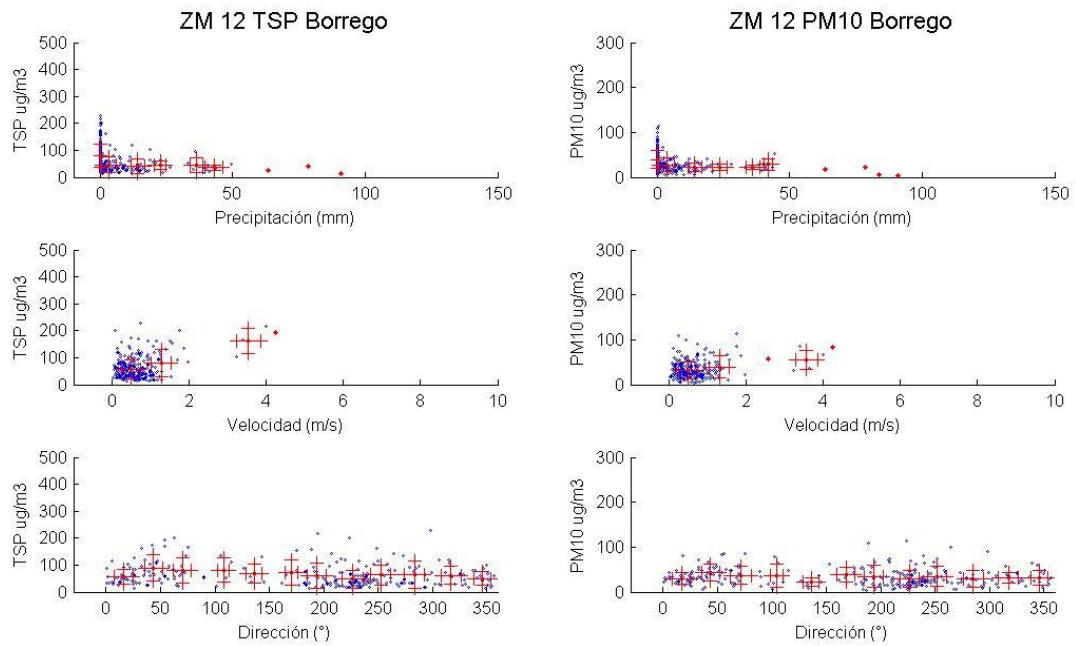


Figura 252 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12

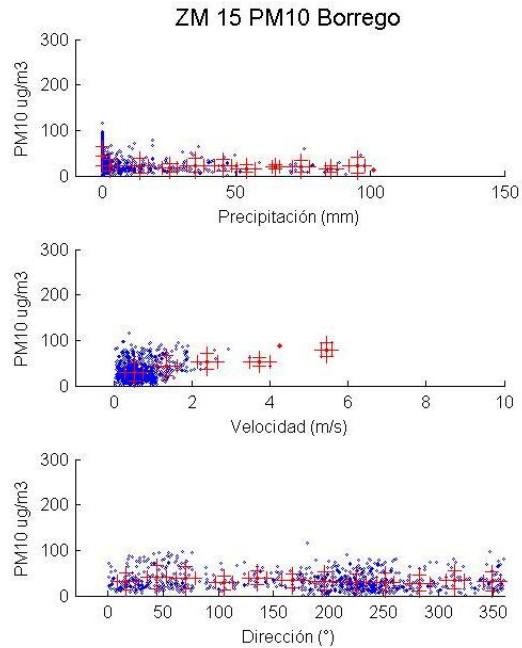


Figura 253 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15

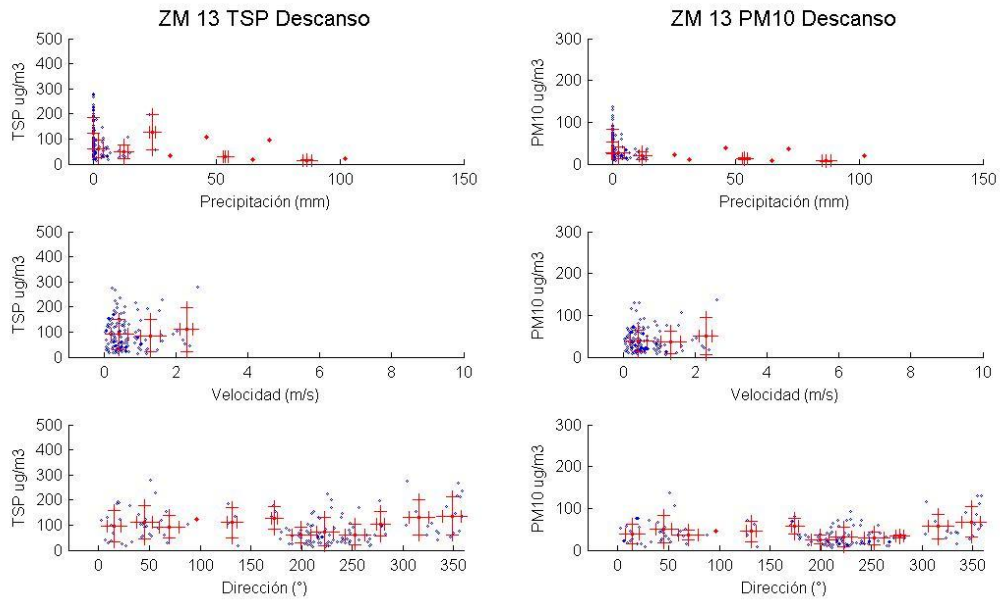


Figura 254 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13

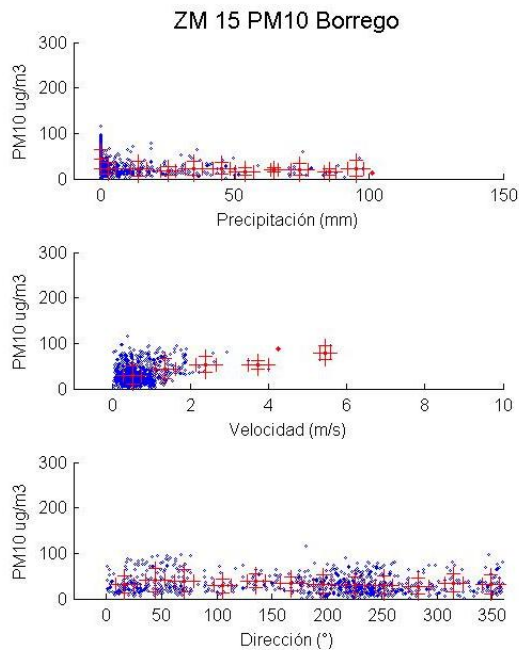


Figura 255 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15

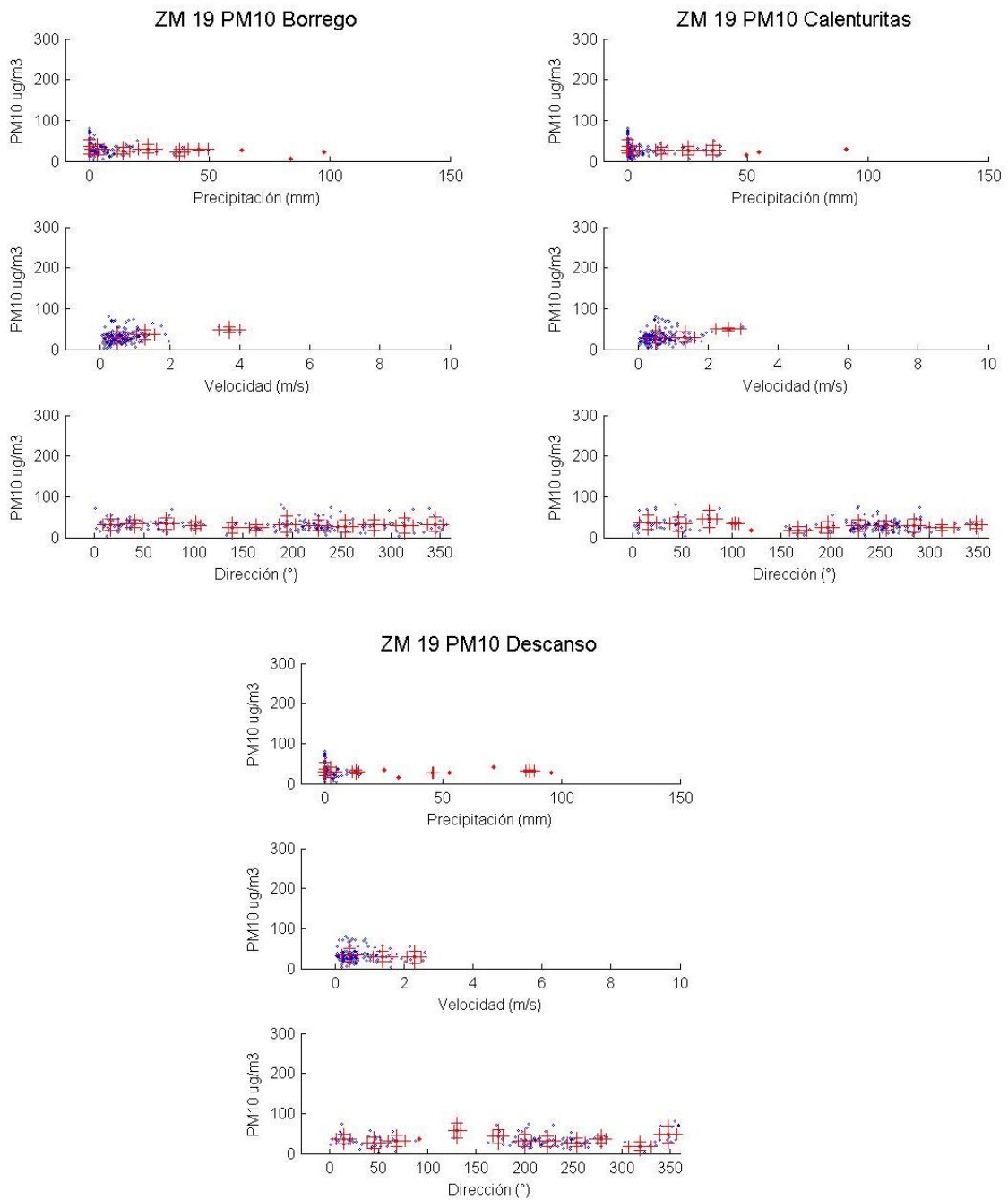


Figura 256 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19

Anexo G Relación de concentración con variables meteorológicas (Enero y febrero)

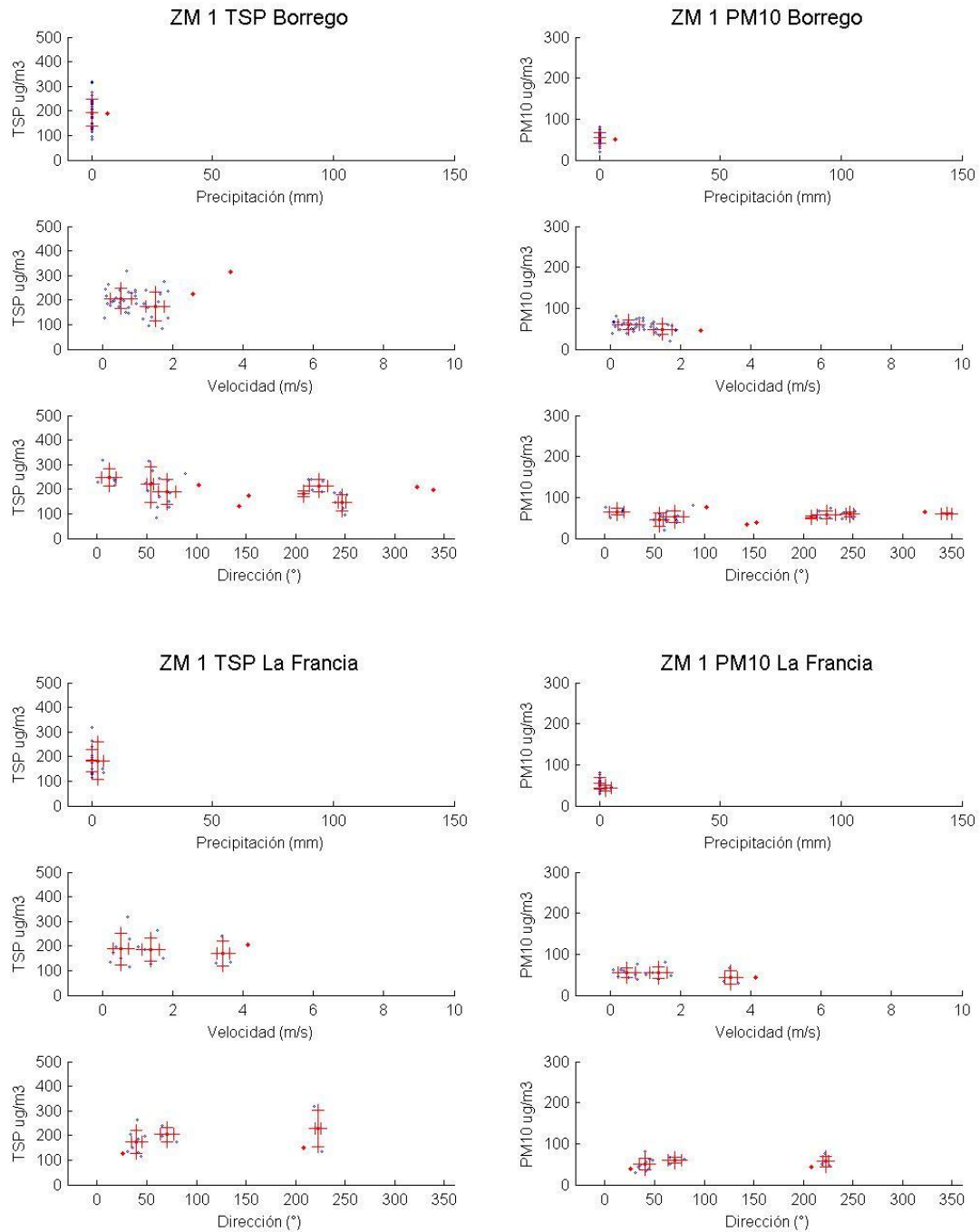


Figura 257 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1 (Enero y febrero)

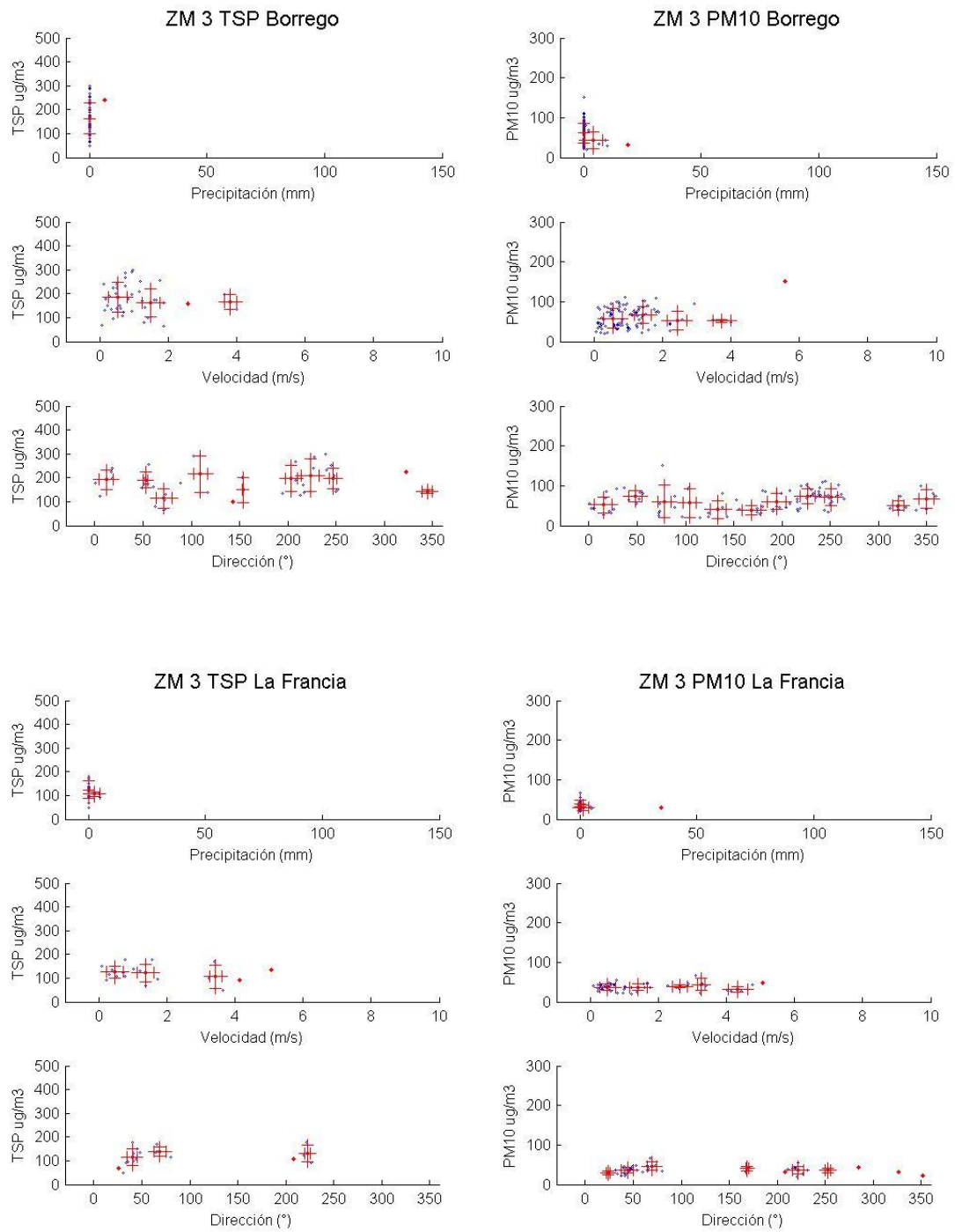


Figura 258 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3 (Enero y febrero)

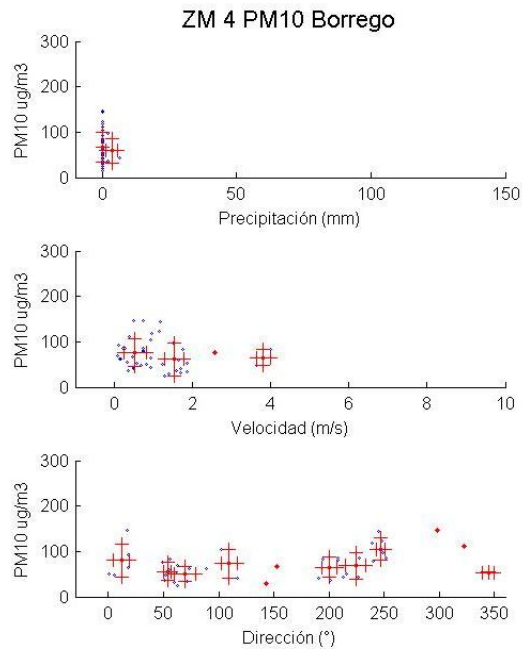


Figura 259 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4 (Enero y febrero)

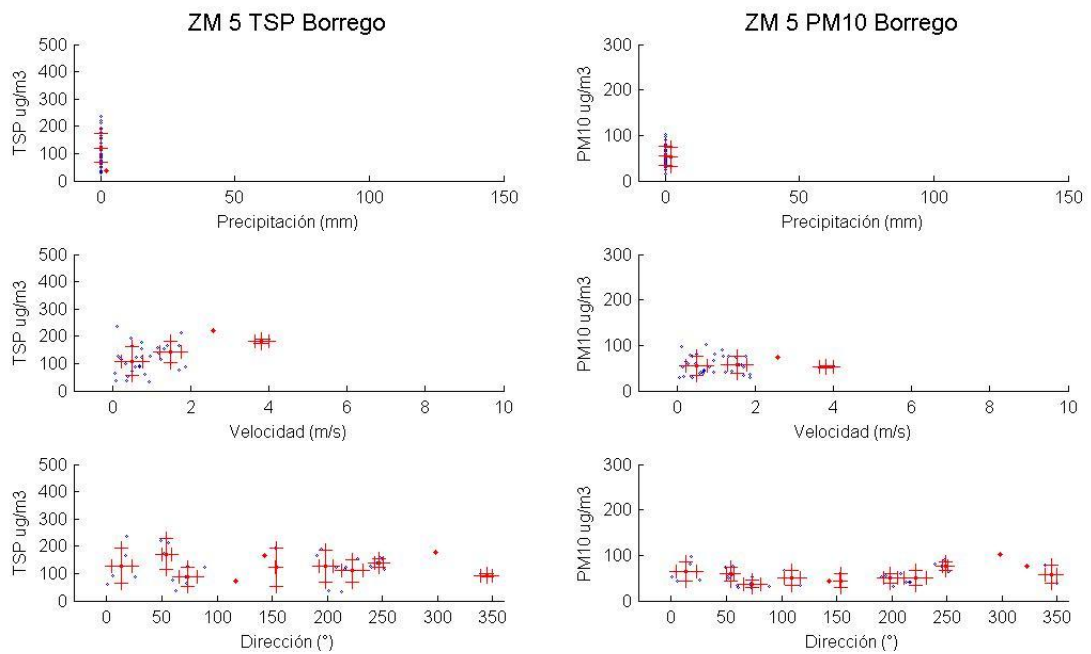


Figura 260 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5 (Enero y febrero)

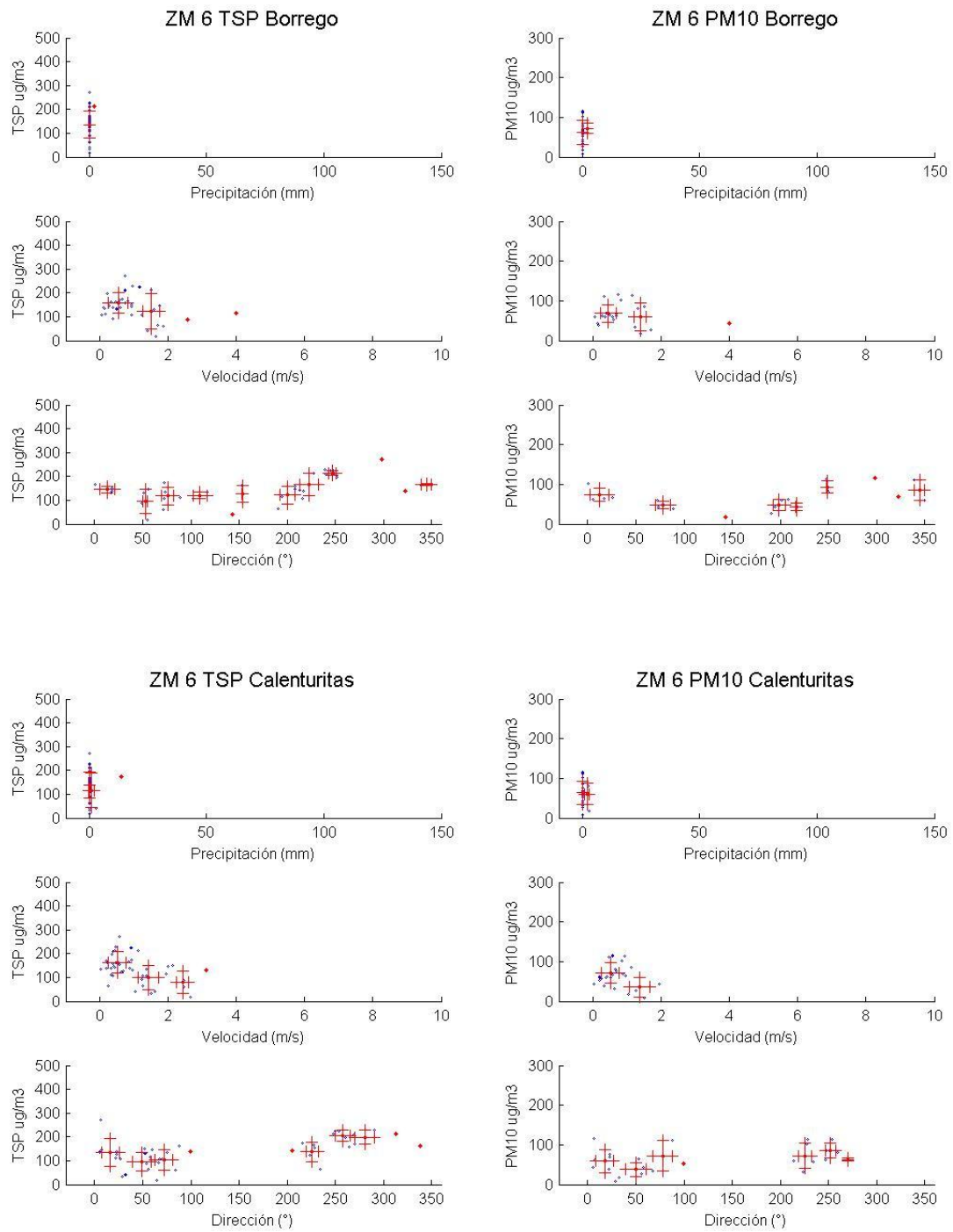


Figura 261 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6 (Enero y febrero)

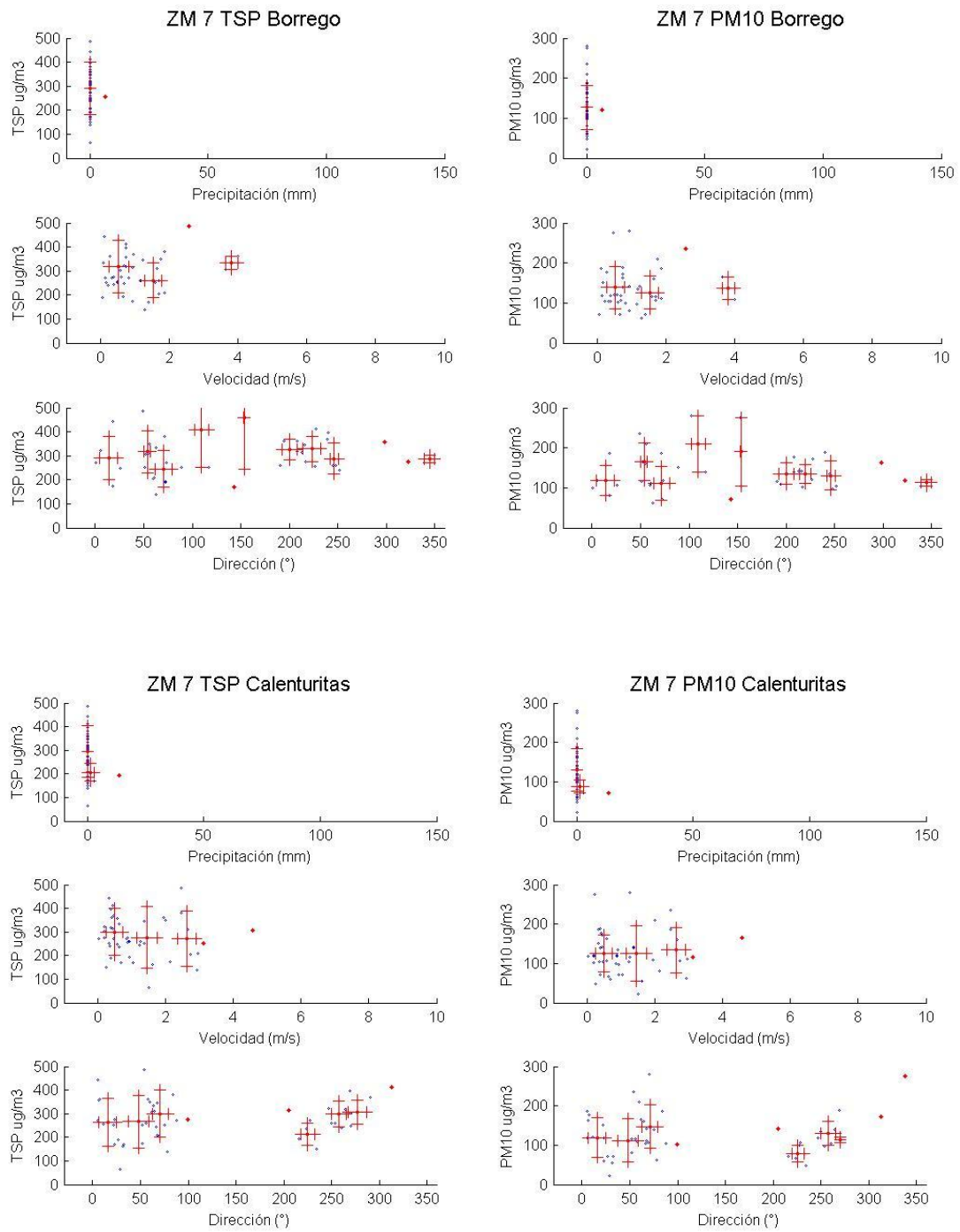


Figura 262 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7 (Enero y febrero)

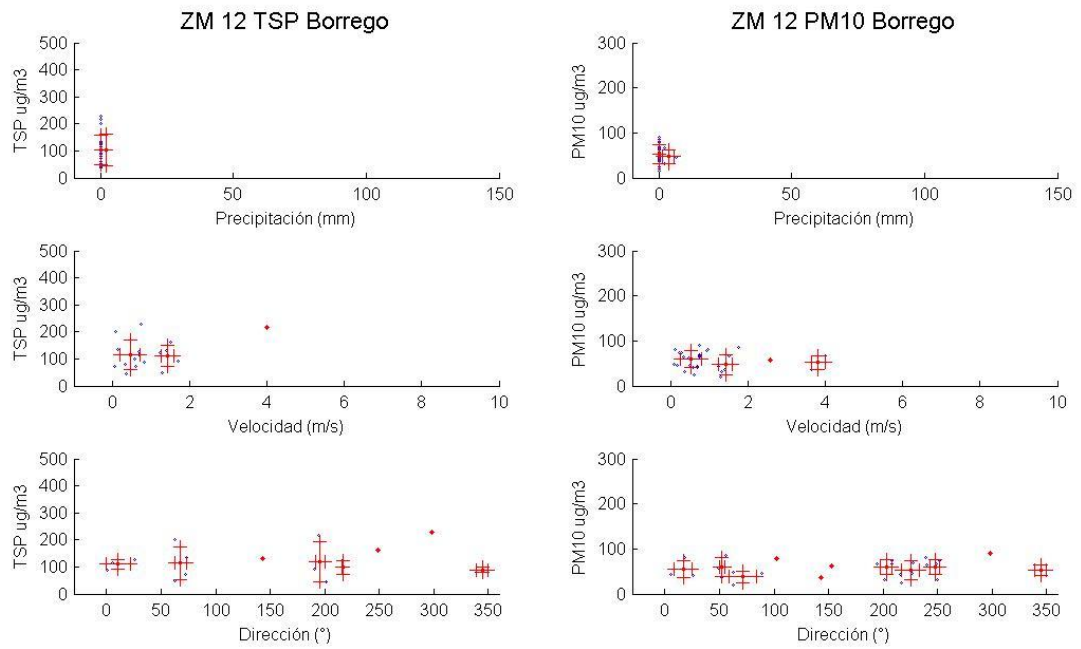


Figura 263 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12 (Enero y febrero)

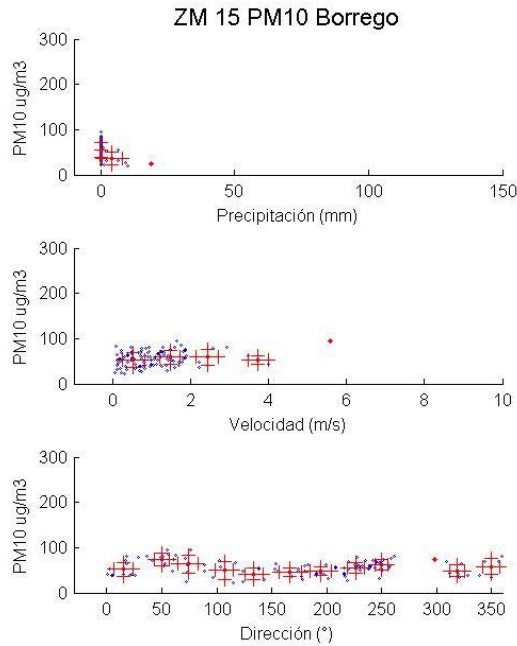


Figura 264 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15 (Enero y febrero)

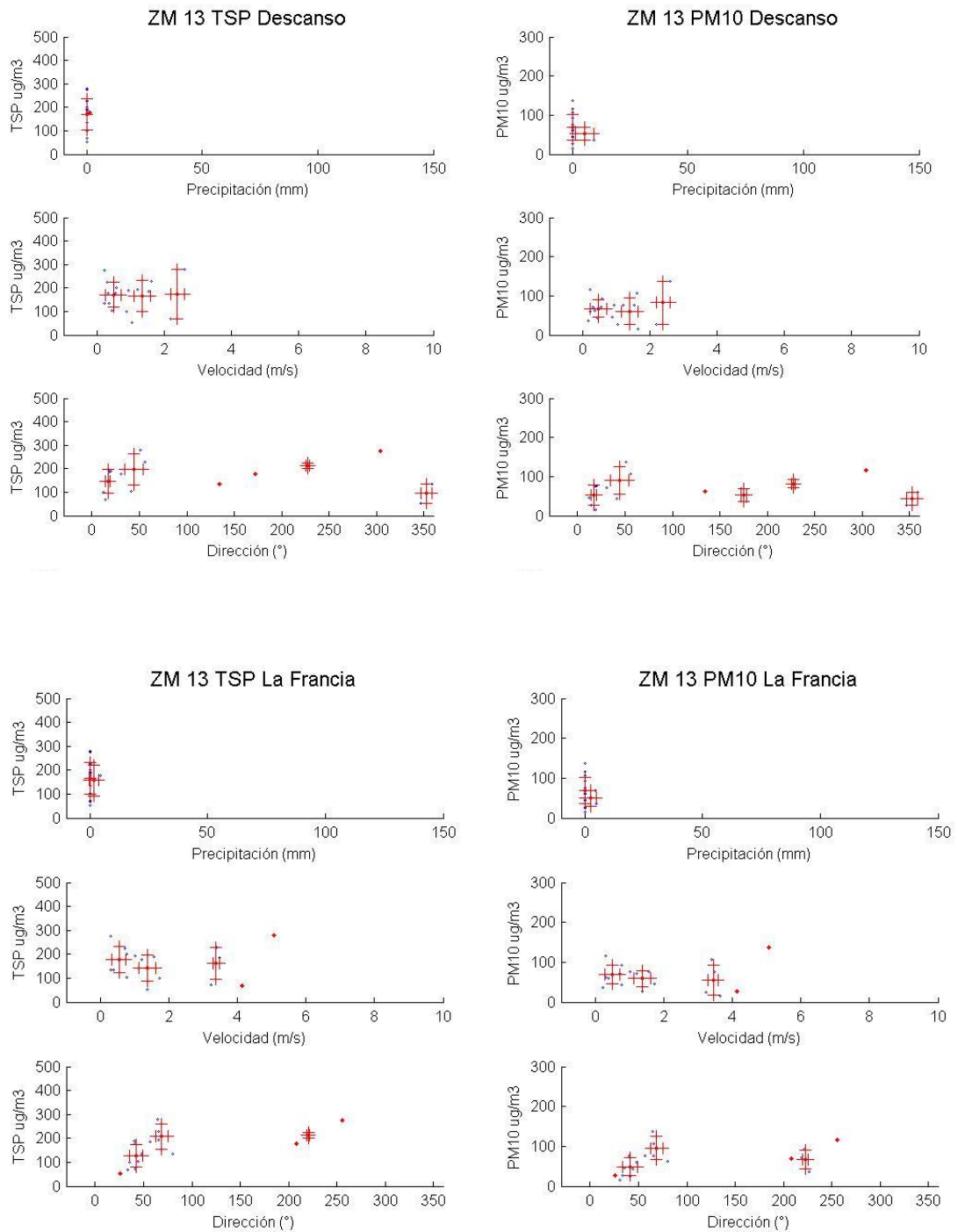


Figura 265 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13 (Enero y febrero)

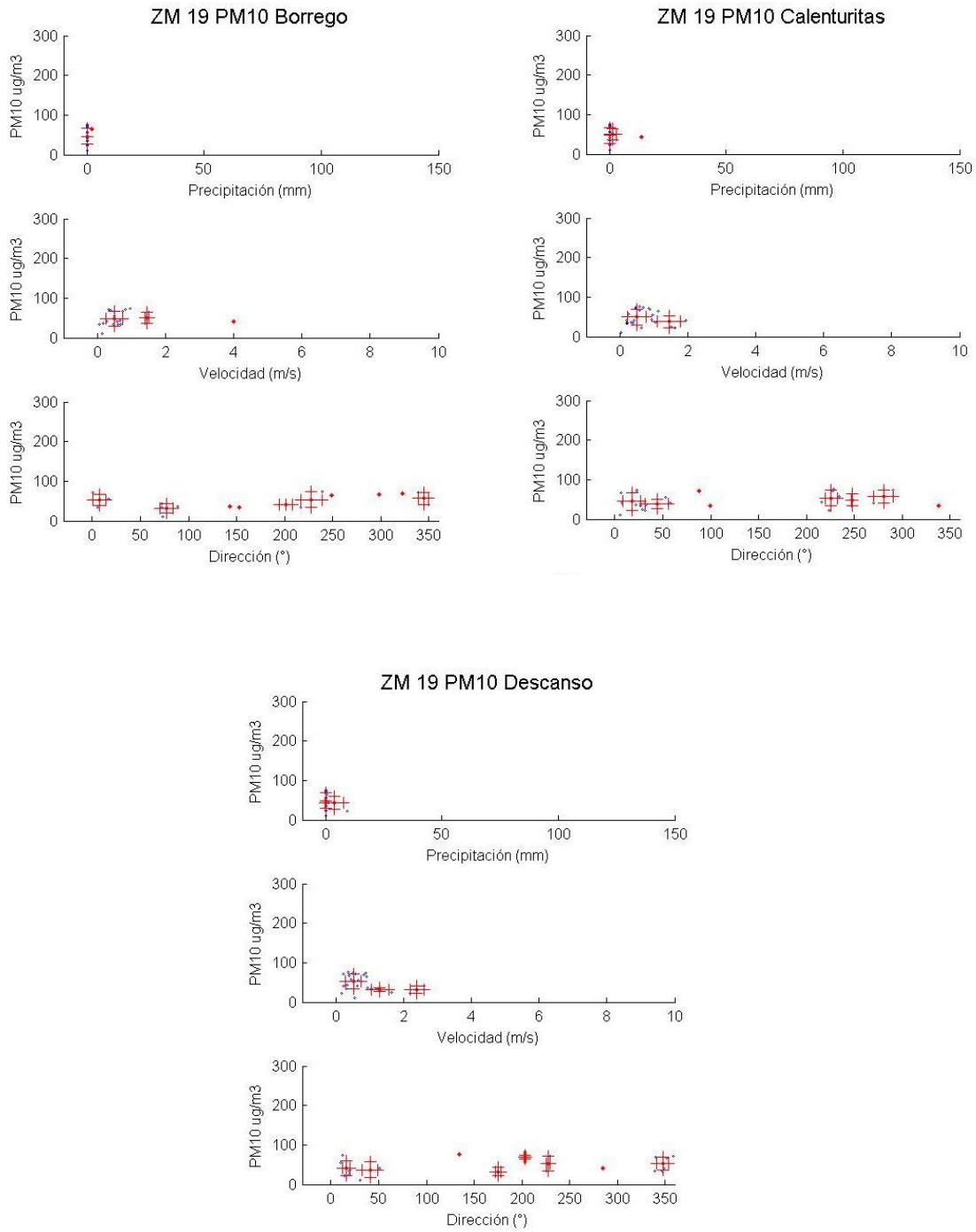


Figura 266 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19 (Enero y febrero)

Anexo H Relación de concentración con variables meteorológicas (Flujo)

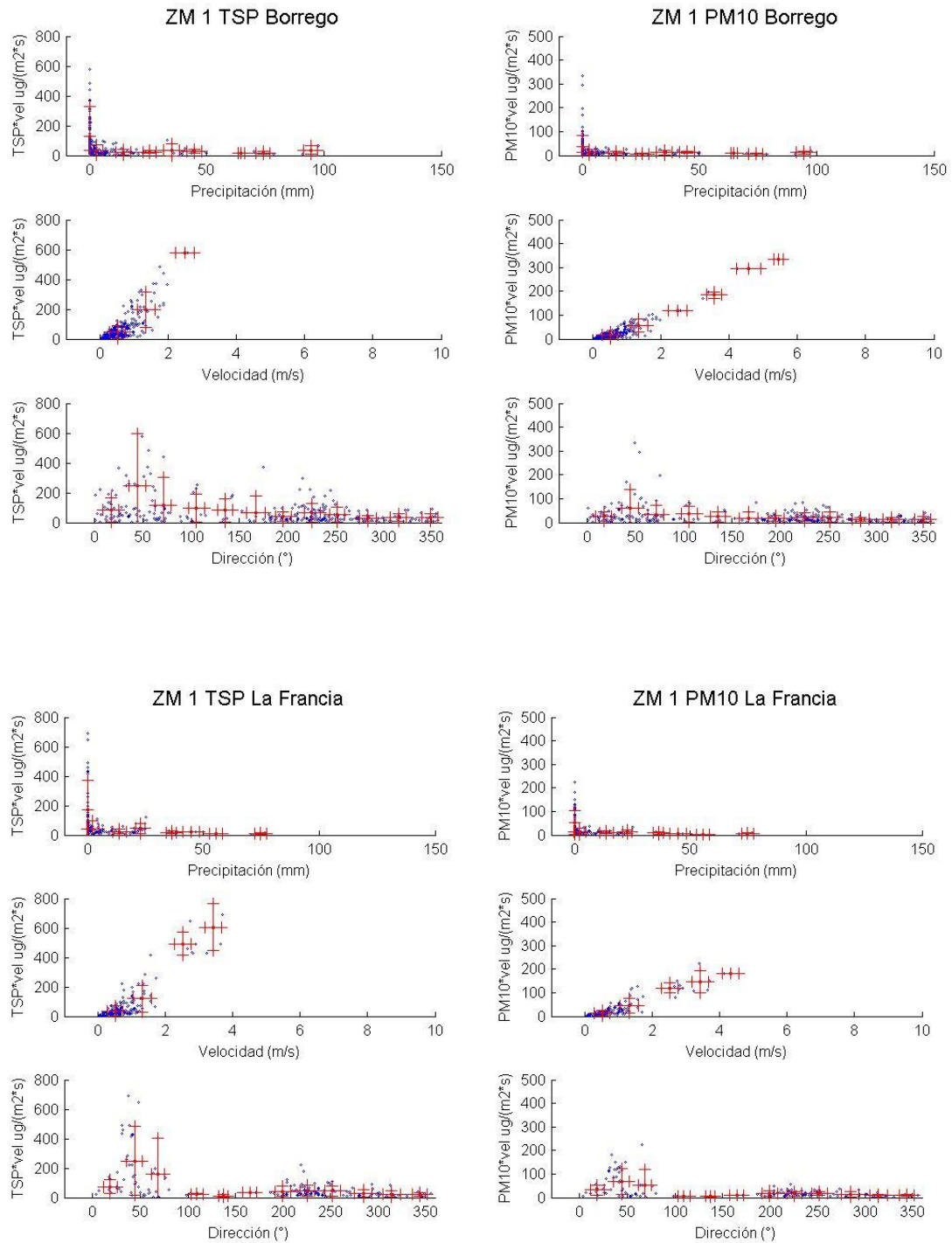


Figura 267 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1

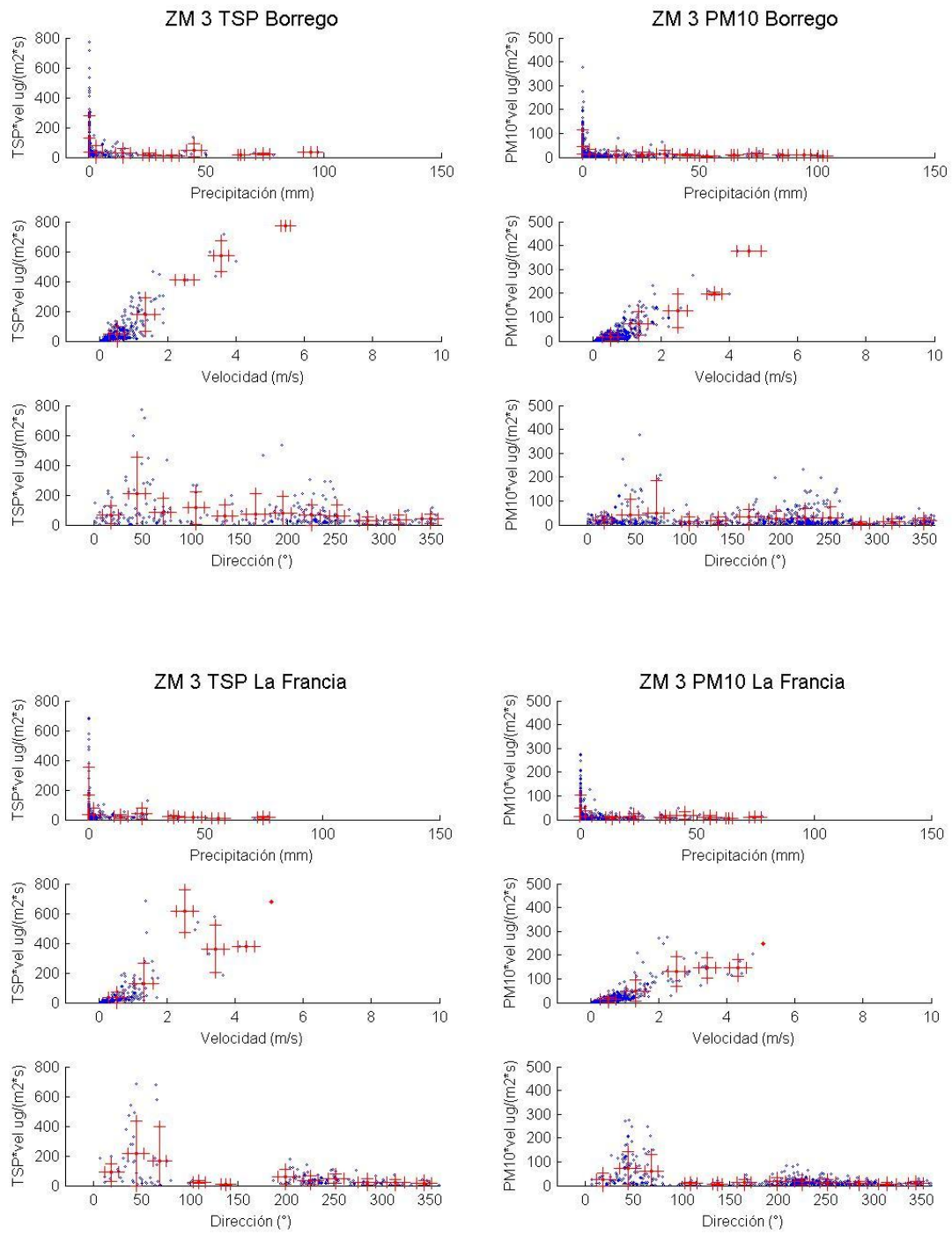


Figura 268 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3

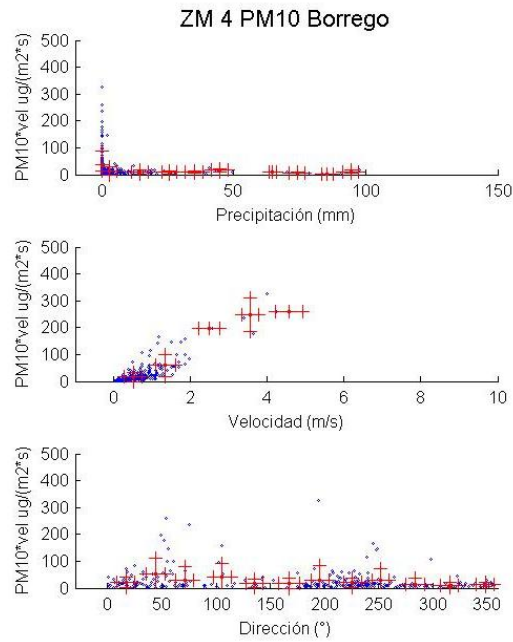


Figura 269 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4

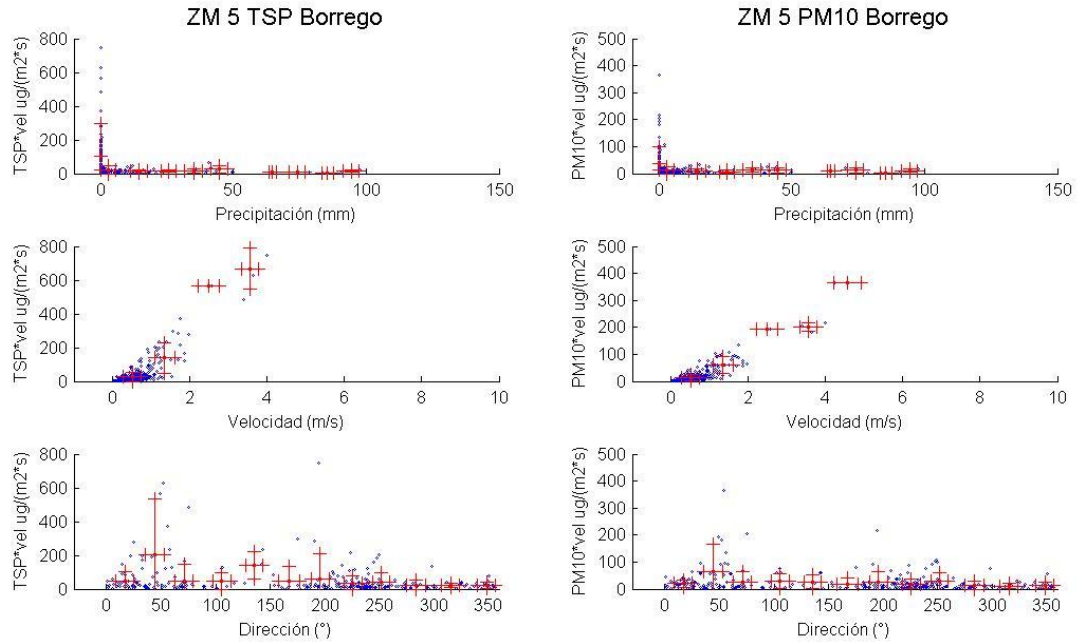


Figura 270 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5

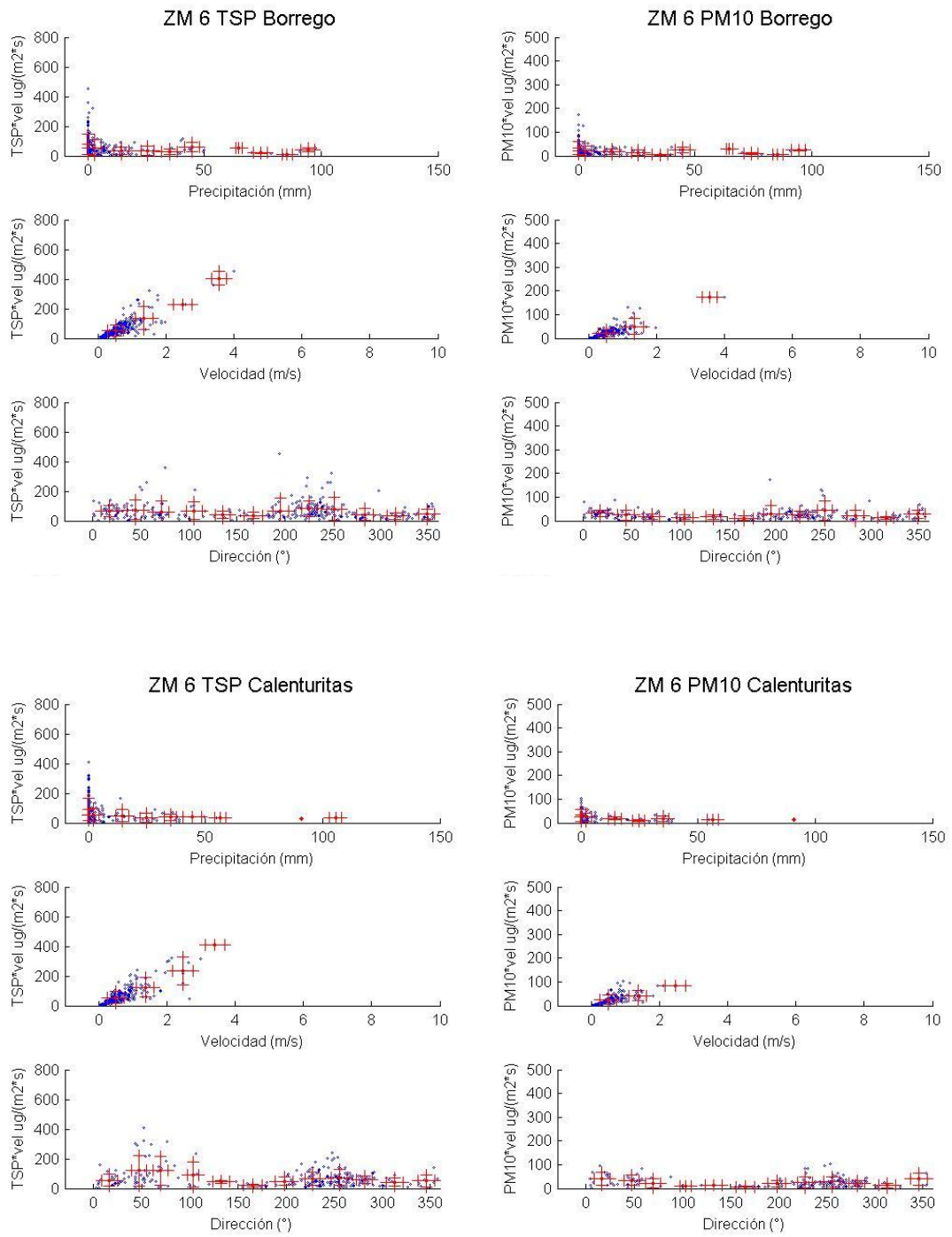


Figura 271 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6

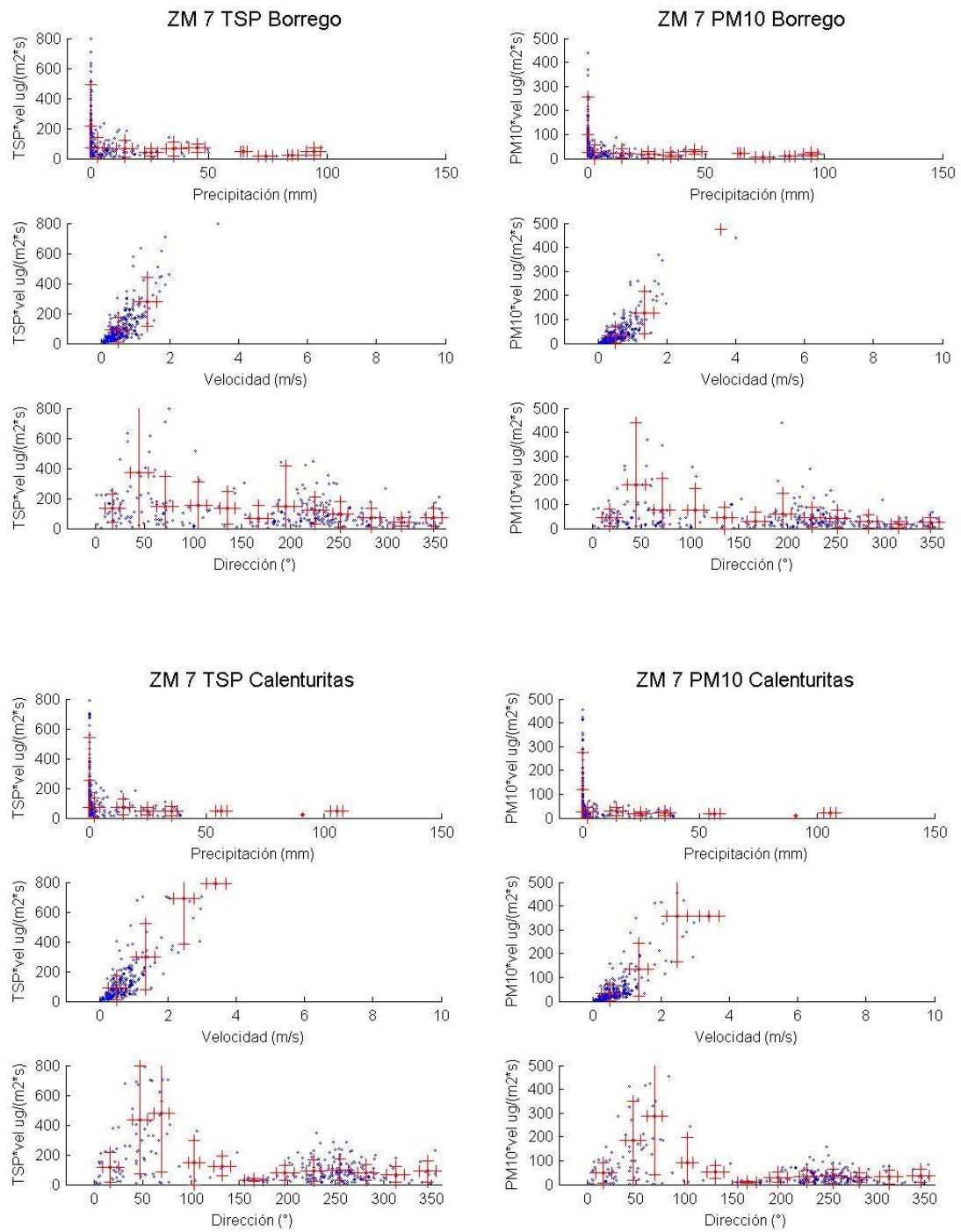


Figura 272 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7

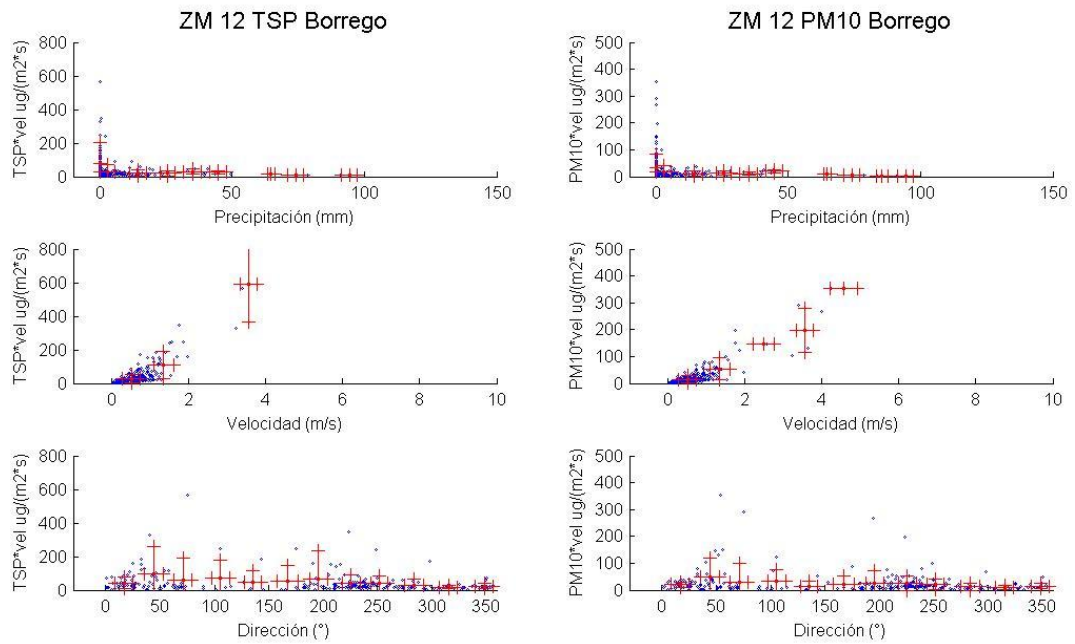


Figura 273 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12

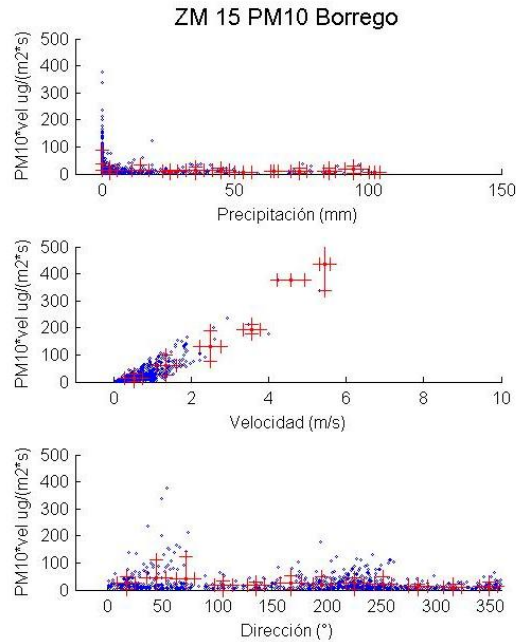


Figura 274 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15

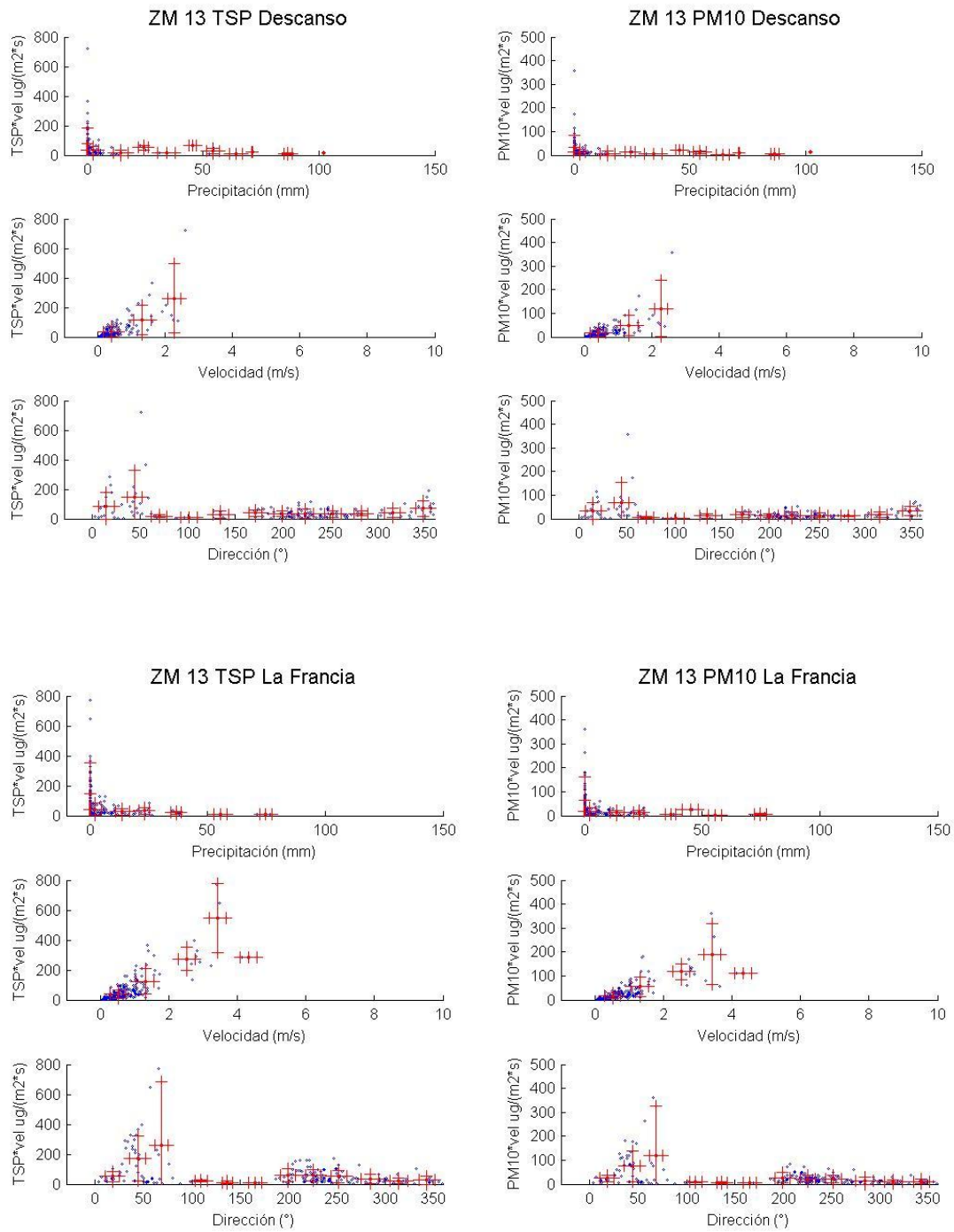


Figura 275 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13

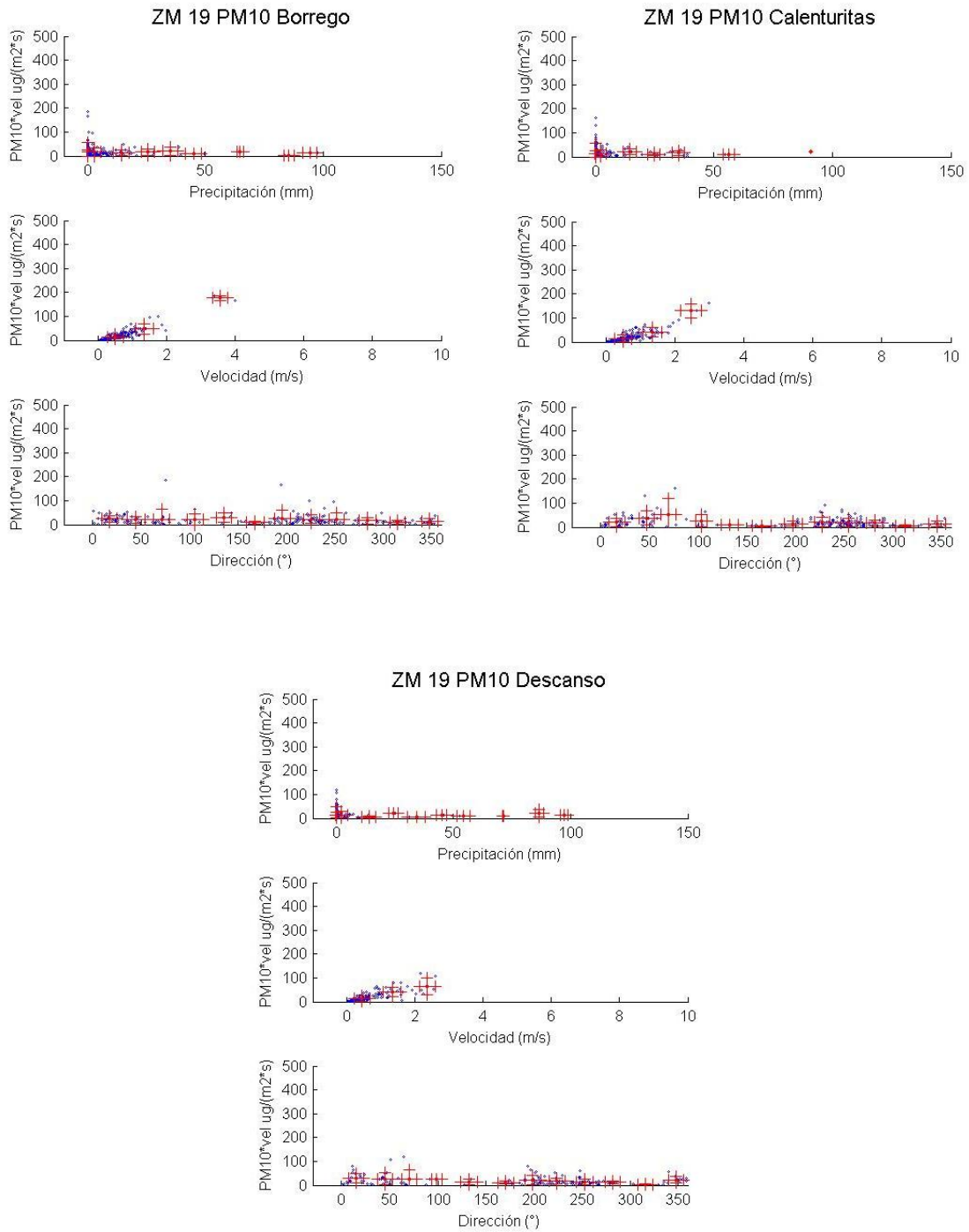


Figura 276 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19

Anexo I Relación de concentración con variables meteorológicas - Flujo (Enero y febrero)

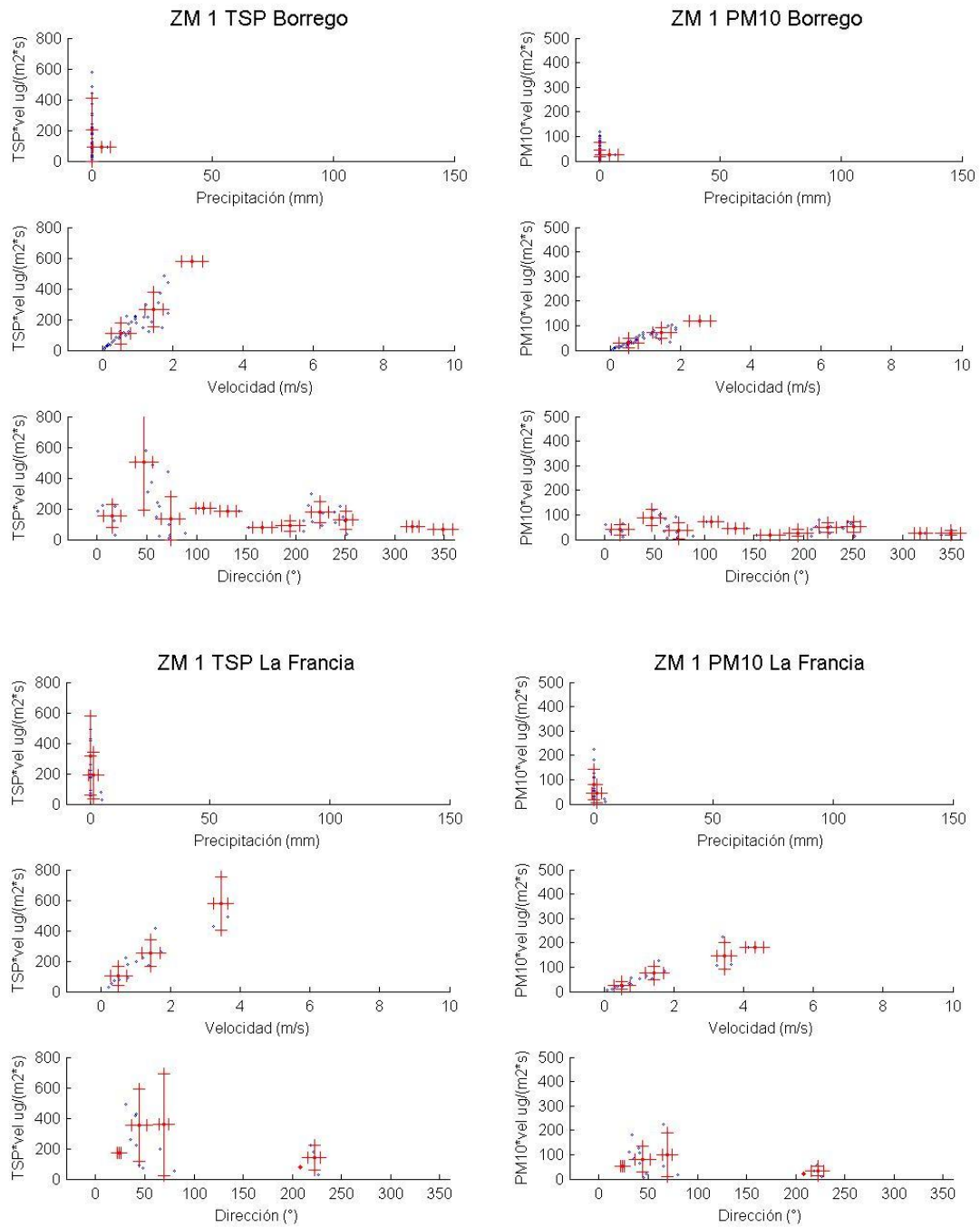


Figura 277 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM1 (Enero y febrero)

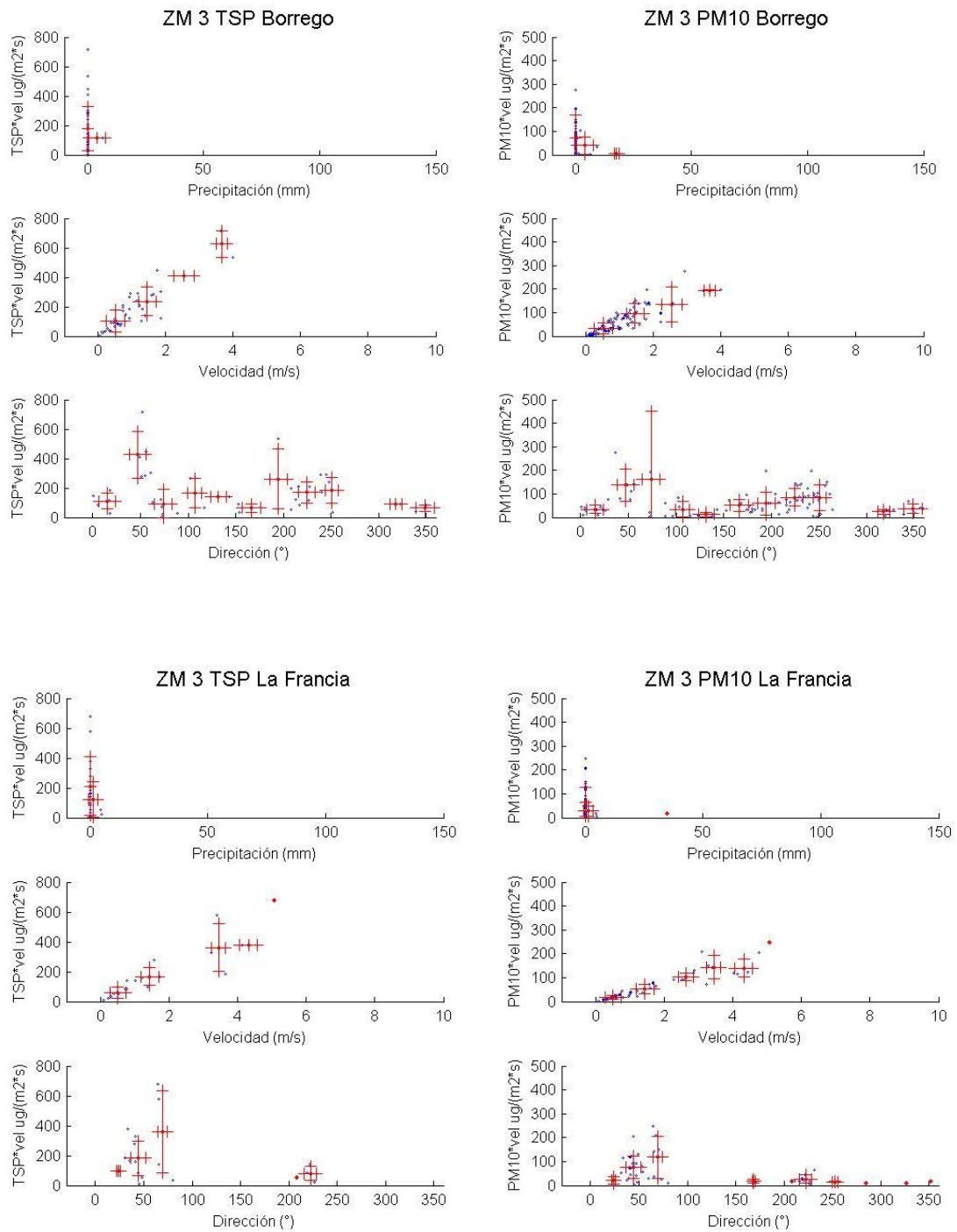


Figura 278 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM3 (Enero y febrero)

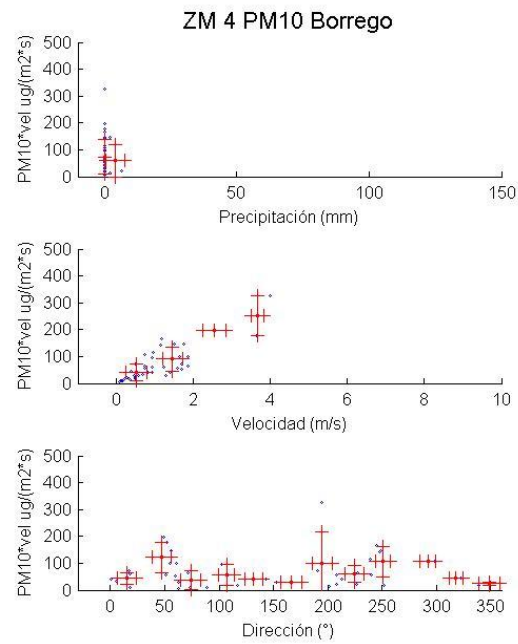


Figura 279 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM4 (Enero y febrero)

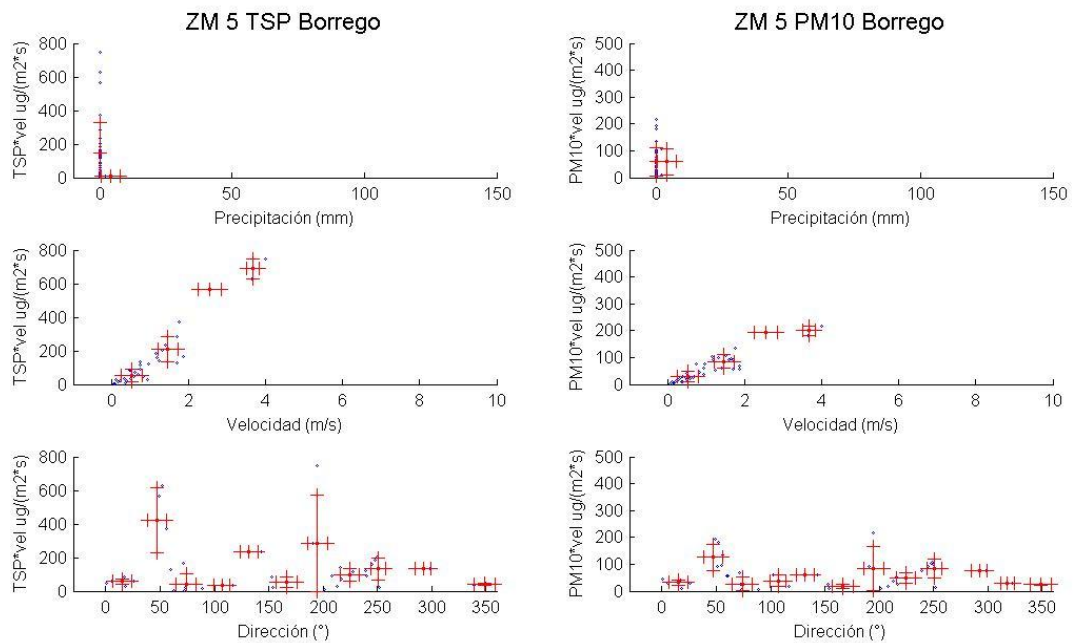


Figura 280 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM5 (Enero y febrero)

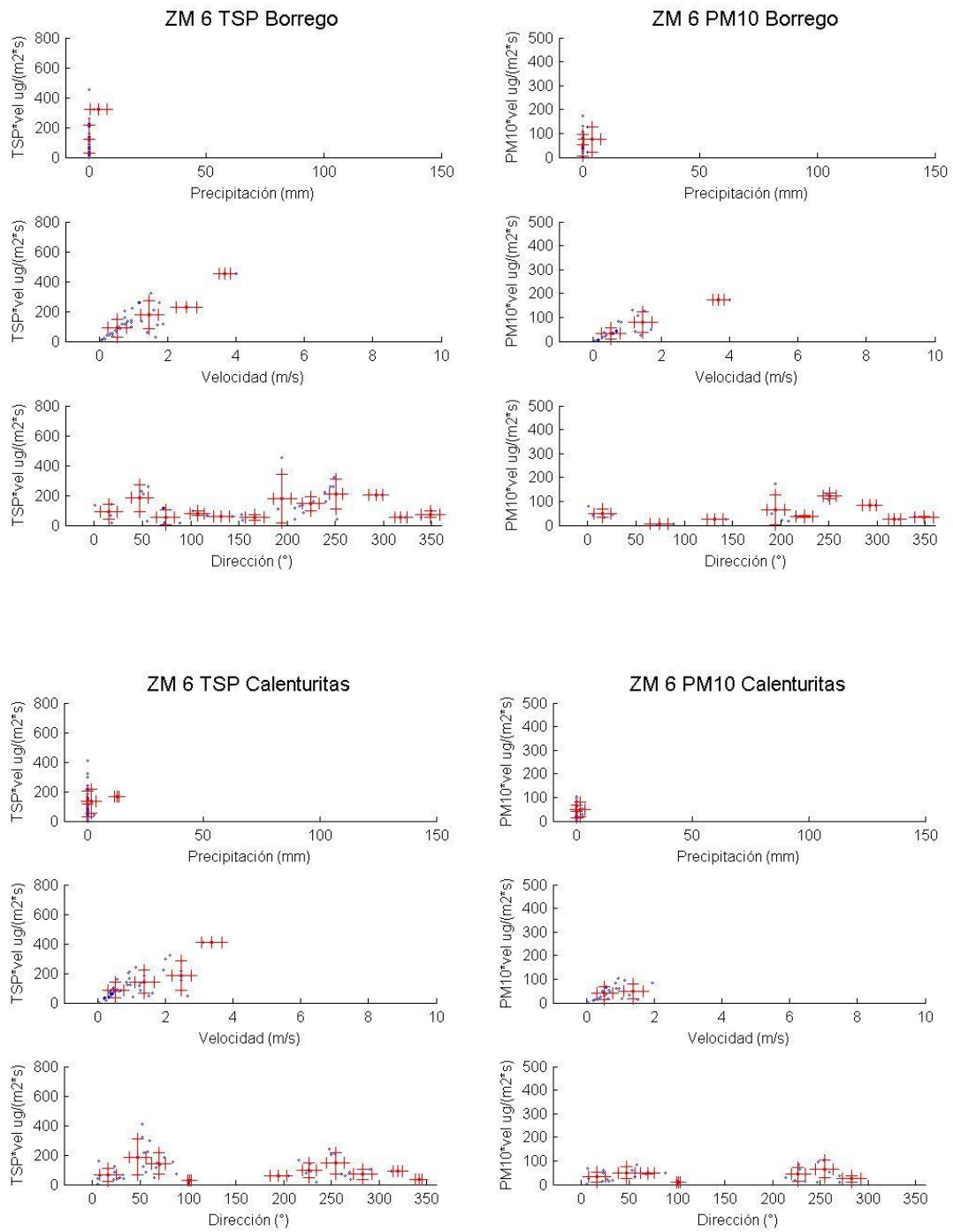
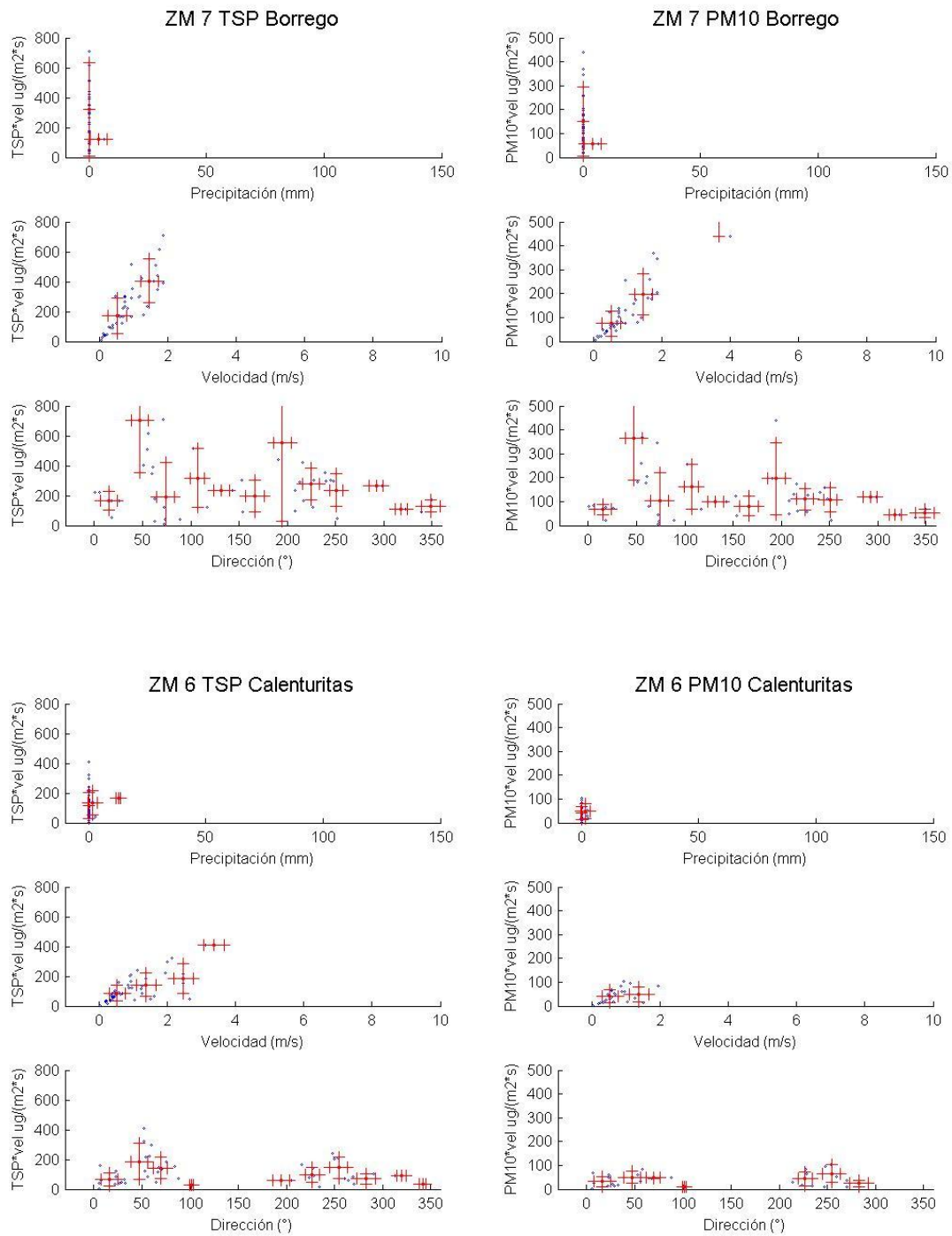


Figura 281 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM6 (Enero y febrero)



(b)

Figura 282 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM7 (Enero y febrero)

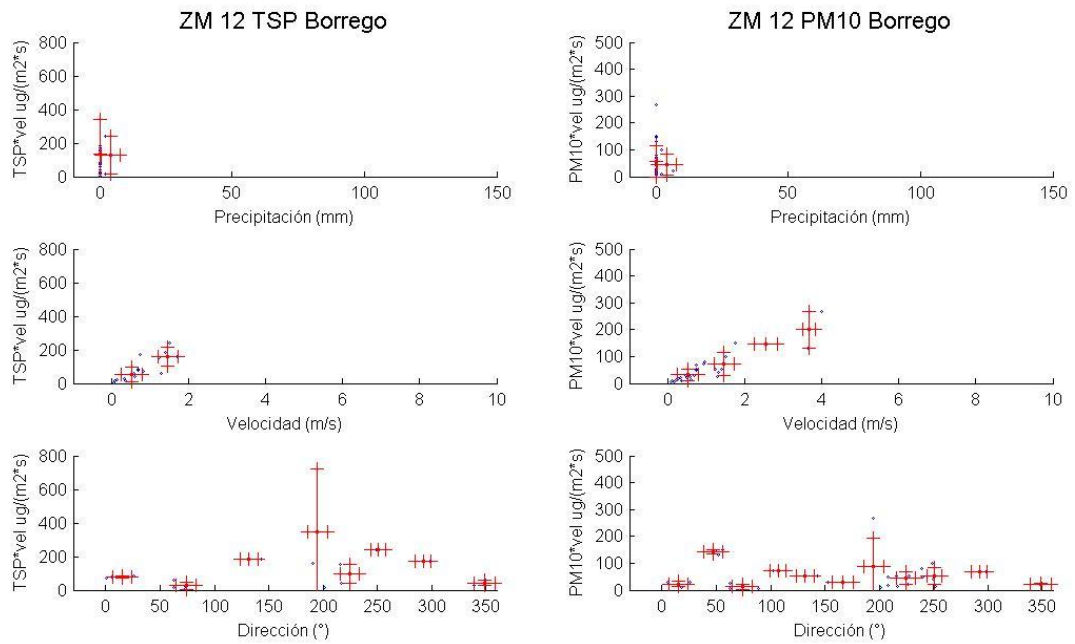


Figura 283 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM12 (Enero y febrero)

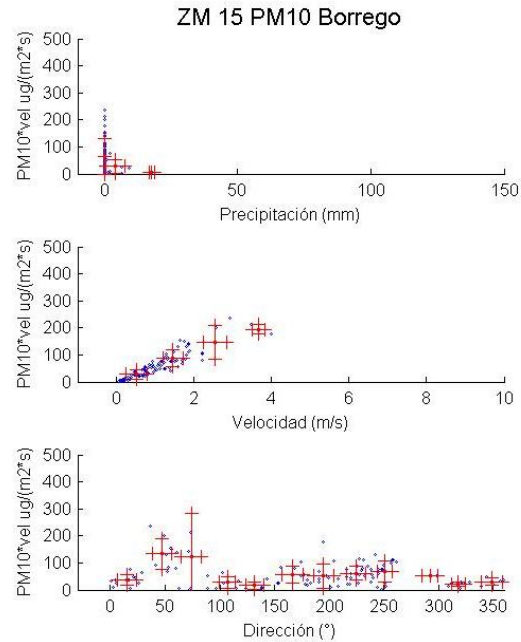


Figura 284 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM15 (Enero y febrero)

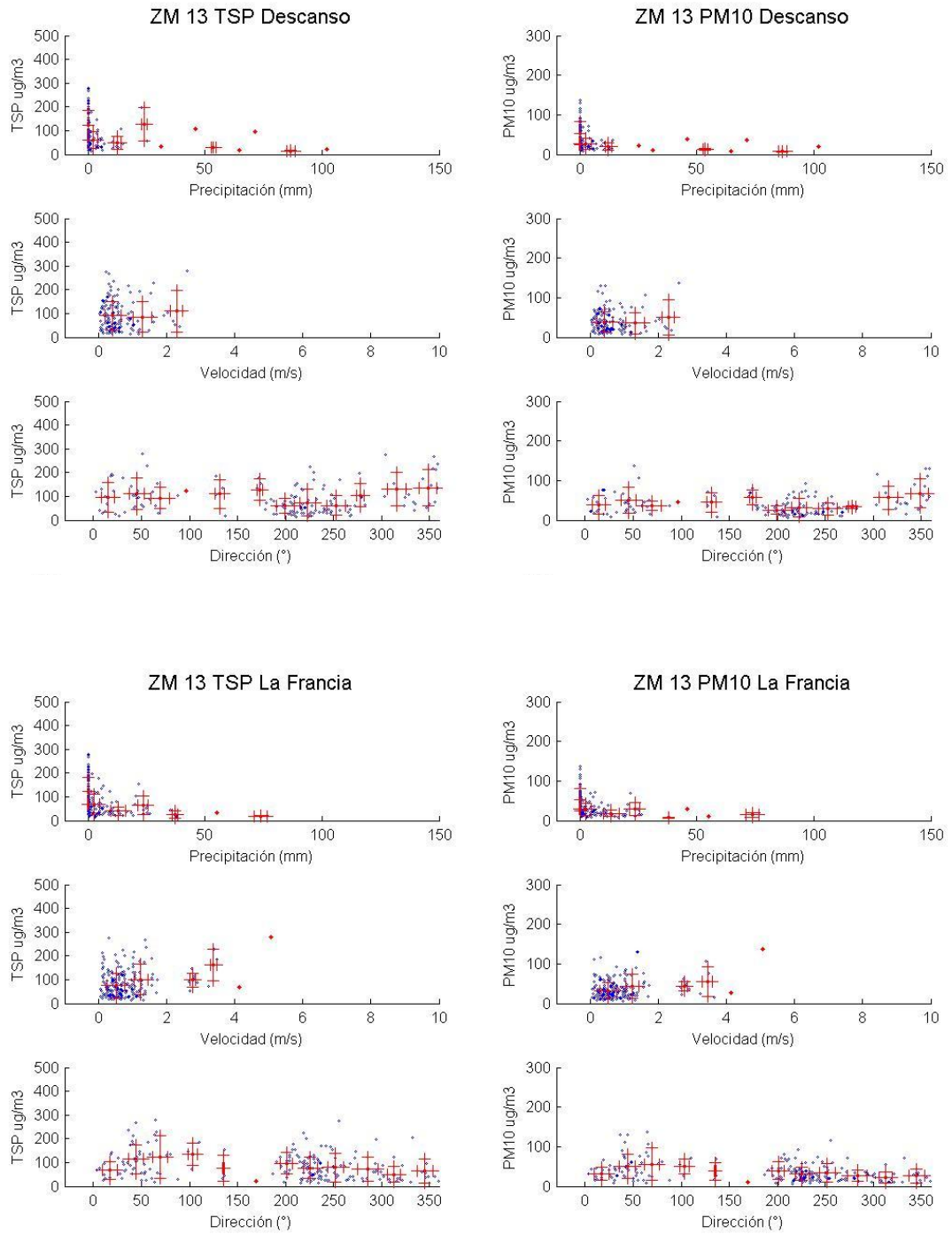


Figura 285 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM13 (Enero y febrero)

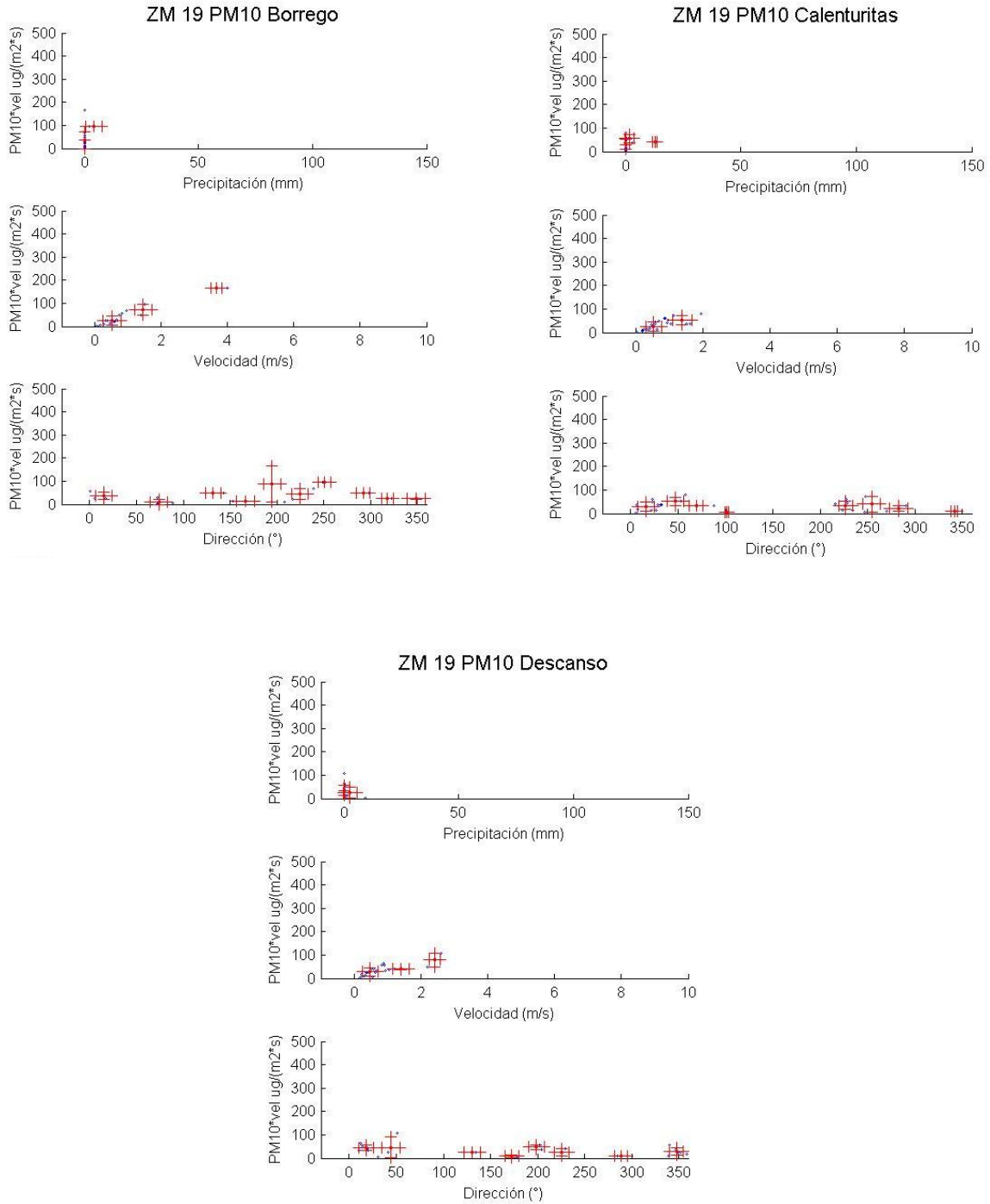


Figura 286 Relación de concentración con variables meteorológicas estación ZM19 (Enero y febrero)