

Informe ID21I10297

M. Abel Herrera y Francisco Zambrano

2025-03-25

Tabla de contenidos

Acerca del Informe	10
Prefacio	11
Introducción	12
I Materiales y método	13
1 Área de estudio y riego	14
Metodología y reporte 2022-2023	17
II Producción	18
2 Producción	19
2.1 Peso total	19
3 Por tratamiento	20
4 Por temporada	21
4.1 Rendimiento	21
5 Por tratamiento	22
6 Por temporada	23
6.1 Densidad	23
7 Por tratamiento	24
8 Por temporada	25
9 Calidad	26
9.1 Apariencia	26
9.1.1 Peso	26
10 Por tratamiento	27

11 Por temporada	28
11.0.1 Diametro	28
12 Por tratamiento	29
13 Por temporada	30
13.1 Color	30
14 Por tratamiento	31
15 Por temporada	32
15.1 Contenido de azucar	32
16 Por tratamiento	33
17 Por temporada	34
17.1 Daño	34
18 Por tratamiento	35
19 Por temporada	36
 III Variables meteorológicas	 37
20 Clima	38
21 Temperatura	39
22 Déficit de presión de vapor (VPD)	40
23 Evapotranspiración de referencia (ET0)	41
24 Precipitación	42
25 Humedad de suelo	43
26 Por tratamiento	44
27 Por temporada	45
28 Serie temporal 2022-2023	46
29 Serie temporal 2023-2024	47

IV Parámetros fisiológicos	48
30 Parámetros fisiológicos	49
30.1 Fluorescencia	49
31 Por tratamiento	50
32 Por temporada	51
33 Series temporales	52
33.1 Potencial	52
34 Por tratamiento	53
35 Por temporada	54
36 Serie temporal	55
36.1 LAI	55
37 Por tratamiento	56
38 Por temporada	57
39 Serie temporal	58
40 Curvas Presión-volumen	59
40.1 La Esperanza	60
41 Tratamiento 0 (control)	61
42 Tratamiento 4	64
42.1 Rio Claro	66
43 Tratamiento 0 (control)	67
44 Tratamiento 1	70
45 Tratamiento 2	73
46 Tratamiento 3	75
47 Tratamiento 4	78
48 Referencias	81
49 Punto de pérdida de turgor	82

V Preprocesamiento de datos de turgor	83
50 Clustering	86
50.1 La Esperanza	86
51 T1 (2022-2023)	87
52 T2 (2022-2023)	89
53 T3 (2022-2023)	91
54 T4 (2022-2023)	93
55 T1 (2023-2024)	95
56 T2 (2023-2024)	97
57 T3 (2023-2024)	99
58 T4 (2023-2024)	101
58.1 Rio Claro	102
59 T1 (2022-2023)	103
60 T2 (2022-2023)	105
61 T3 (2022-2023)	107
62 T4 (2022-2023)	109
63 T1 (2023-2024)	111
64 T2 (2023-2024)	113
65 T3 (2023-2024)	115
66 T4 (2023-2024)	117
67 Limpieza de datos: eliminación de clusters	119
67.1 La Esperanza	119
68 T1 (2022-2023)	120
69 T2 (2022-2023)	122
70 T3 (2022-2023)	124

71 T4 (2022-2023)	126
72 T1 (2023-2024)	128
73 T2 (2023-2024)	130
74 T3 (2023-2024)	132
75 T4 (2023-2024)	134
75.1 Rio Claro	135
76 T1 (2022-2023)	136
77 T2 (2022-2023)	138
78 T3 (2022-2023)	140
79 T4 (2022-2023)	142
80 T1 (2023-2024)	144
81 T2 (2023-2024)	145
82 T3 (2023-2024)	147
83 T4 (2023-2024)	149
84 Estandarización de clusters	151
84.1 La Esperanza	151
85 T1 (2022-2023)	152
86 T2 (2022-2023)	154
87 T3 (2022-2023)	156
88 T4 (2022-2023)	158
89 T1 (2023-2024)	160
90 T2 (2023-2024)	162
91 T3 (2023-2024)	164
92 T4 (2023-2024)	166
92.1 Rio Claro	167

93 T1 (2022-2023)	168
94 T2 (2022-2023)	170
95 T3 (2022-2023)	172
96 T4 (2022-2023)	174
97 T1 (2023-2024)	176
98 T2 (2023-2024)	177
99 T3 (2023-2024)	179
100T4 (2023-2024)	181
101Datos preprocesados	183
101.1A nivel de unidad	183
101.1.1 La Esperanza	183
102T1 (2022-2023)	184
103T2 (2022-2023)	187
104T3 (2022-2023)	190
105T4 (2022-2023)	193
106T1 (2023-2024)	196
107T2 (2023-2024)	199
108T3 (2023-2024)	202
109T4 (2023-2024)	205
109.0.1 Rio Claro	207
110T1 (2022-2023)	208
111T2 (2022-2023)	211
112T3 (2022-2023)	214
113T4 (2022-2023)	217
114T1 (2023-2024)	220

115T2 (2023-2024)	222
116T3 (2023-2024)	225
117T4 (2023-2024)	228
117.1A nivel de tratamiento	230
117.1.1 La Esperanza	230
118T1 (2022-2023)	231
119T2 (2022-2023)	232
120T3 (2022-2023)	233
121T4 (2022-2023)	234
122T1 (2023-2024)	235
123T2 (2023-2024)	236
124T3 (2023-2024)	237
125T4 (2023-2024)	238
126T1 (2022-2023)	239
127T2 (2022-2023)	240
128T3 (2022-2023)	241
129T4 (2022-2023)	242
130T1 (2023-2024)	243
131T2 (2023-2024)	244
132T3 (2023-2024)	245
133T4 (2023-2024)	246
 VI Modelo de potencial y SatOri	 247
134Modelos basados en tres algoritmos	248
135SatOri	250
135.1Descripción general	250

135.2 Diseño de la aplicación	250
135.2.1 Funcionamiento de la aplicación	250
135.3 Dashboard de la plataforma	251
135.4 Acceso a la plataforma	252
References	253

Acerca del Informe

Reporte general del proyecto ID21I10297, financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por medio del proyecto FONDEF IDEA 2021.

Este proyecto estuvo a cargo del director Dr. Francisco Zambrano Bigiarini de la Universidad Mayor.

Investigadores que participaron en el proyecto:

- Dr. Francisco Zambrano - Director - Centro Hemera UMayor
- Dra. Andrea Miyasaka Almeyda - Directora Alterna - Centro CGB UMayor
- Dr. Felipe de La Hoz - Investigador - Externo
- Paulina Vidal - Investigadora - Centro Hemera UMayor
- Idania Briceño - Investigadora - Centro Hemera UMayor

Además, trabajaron como asistentes de investigación los siguientes profesionales:

- Jesica Garrido - Centro Hemera UMayor
- Abel Herrera - Centro Hemera UMayor

Prefacio

Este informe presenta metodología y los resultados obtenidos en el marco del proyecto FONDEF ID21I10297. En este proyecto se desarrolló **SatOri**, una aplicación para la optimización de riego en frutales. La que contribuye a la adaptación al cambio climático de la agricultura chilena.

SatOri desarrolló un modelo para la estimación espacial con frecuencia diaria del potencial hídrico xilemático (Ψ_x). El Psi_x permite monitorear la respuesta de la planta a las condiciones medio ambientales y de abastecimiento hídrico. Se utilizaron algoritmos de machine learning, datos meteorológicos y de imágenes satelitales Sentinel-2, para el desarrollo del modelo.

Por otra parte, **SatOri** calcula el nivel de Psi_x mínimo que pueden alcanzar los árboles. De esta manera establece un semáforo de acuerdo a este umbral y a los resultados del modelo. Indicando al agricultor cuánto es el tiempo de riego que debe suministrar cada sector, para que no se vea afectado el aparato fotosintético de la planta y así no haya merma en la producción y calidad de la fruta.

Introducción

El cambio climático ha intensificado la sequía en diversas regiones del mundo, afectando particularmente a Chile Central, donde se ha registrado un evento de Mega Sequía sin precedentes en los últimos milenios. Desde 2010, la zona ha experimentado una reducción sostenida de las precipitaciones, con déficits promedio entre 20-40% (Garreaud et al. 2020). Este fenómeno impacta directamente la disponibilidad hídrica para la agricultura, con repercusiones en la productividad y sostenibilidad del sector (Peña-Guerrero et al. 2020). Ante este escenario, se requieren estrategias de gestión del agua más eficientes que permitan a los productores agrícolas adaptarse a la variabilidad climática (Hurlbert y Gupta 2017).

En este contexto, el riego deficitario controlado (RDC) ha sido identificado como una estrategia eficaz para optimizar el uso del agua en cultivos perennes como los frutales, donde las opciones de adaptación son limitadas (Pechan et al. 2023). Esta práctica permite reducir el consumo hídrico sin afectar significativamente la producción ni la calidad de la cosecha, mejorando la eficiencia del recurso disponible (Victor Blanco et al. 2019; López-Olivari y Ortega-Klose 2021). Entre los frutales de exportación, el cerezo es el segundo producto de mayor valor en la agroindustria chilena, con más de 25 000 hectáreas bajo riego y un mercado aproximado de 1560 millones de dólares (Carrasco-Benavides, Antunez-Quilobrán, et al. 2020; González 2022). La optimización del riego en este cultivo es fundamental para mejorar la sostenibilidad del sector y mantener su competitividad a nivel internacional.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un prototipo de servicio web para la optimización del riego en cerezo (SatOri), que permita a los productores ajustar los tiempos y volúmenes de riego en función de datos obtenidos de sensores satelitales ópticos y de radar, complementados con ensayos de riego deficitario controlado. Para ello, se evaluará el nivel de riego deficitario óptimo en huertos de cerezo ubicados en la región de O'Higgins durante las temporadas 2022-2023, desarrollando un modelo de estimación del potencial hídrico xilemático (Ψ_s) basado en variables meteorológicas y satelitales. Posteriormente, el modelo y los niveles óptimos de riego serán validados en la temporada 2023-2024, con el fin de integrarlos en una plataforma web que entregue información en tiempo real sobre la gestión del riego, contribuyendo así a la eficiencia en el uso del agua en la producción de cerezas.

Parte I

Materiales y método

1 Área de estudio y riego

El estudio se realizó en dos huertos comerciales de cerezos dulces (*Prunus avium* L., variedad Regina) de la empresa Garces Fruit www.garcesfruit.com en la región de O'Higgins, en la zona central de Chile. Los huertos son Rio Claro, que tiene 60 ha y árboles de 9 años, y La Esperanza, con 40 ha y árboles de 6 años (Fig. 1a y 1b). El estudio se llevó a cabo durante las temporadas de riego 2022-2023 y 2023-2024, que van de octubre a abril.

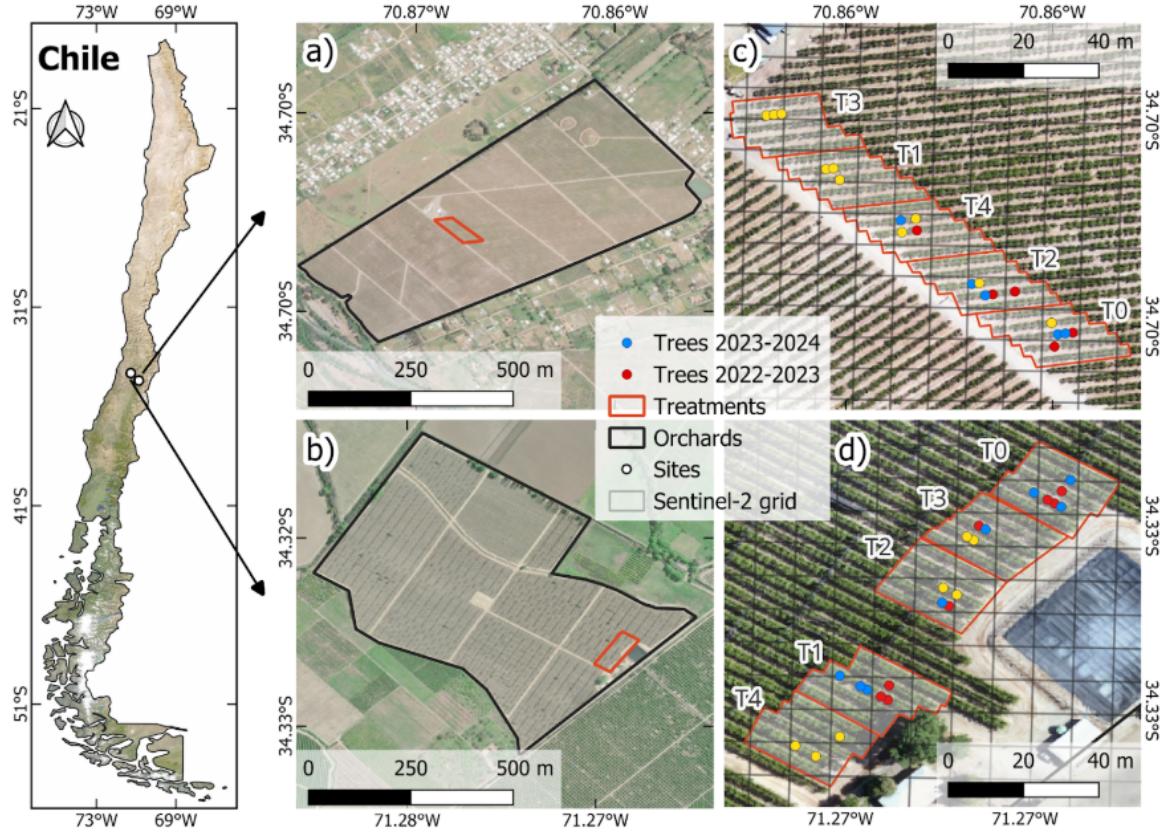


Figura 1.1: Figura 1. Área de estudio. El mapa a la izquierda muestra la ubicación de los huertos en la región central de Chile. Los mapas a la derecha muestran los huertos en (a) Rio Claro y (b) La Esperanza, y (c) y (d) representan los tratamientos de riego (T0, T1, T2, T3, T4). Los puntos rojos y azules representan los árboles experimentales seleccionados para las temporadas 2022-2023 y 2023-2024, respectivamente, mientras que los puntos amarillos indican los árboles seleccionados para ambas temporadas.

Para aumentar la variabilidad del estado hídrico de las plantas, se implementaron cinco tratamientos diferentes de reposición de riego en cada huerto. La cantidad de riego se gestionó utilizando el ET0 y Ψ_s como referencias. Los tratamientos de riego fueron T1, T2, T3 y T4, siendo T1 el menos restrictivo y T4 el más restrictivo en cuanto al suministro de agua (Fig. 1c y 1d). Además, se estableció un tratamiento control (T0), el cual recibió el riego estándar proporcionado por el productor local. Cada parcela de tratamiento contuvo 60 árboles y abarcó un área de 0.048 ha. Los tratamientos se aplicaron durante las temporadas consecutivas de crecimiento 2022–2023 y 2023–2024. No obstante, en la segunda temporada no se aplicaron los tratamientos T1 a T4 en La Esperanza, ya que los resultados obtenidos en la temporada anterior no mostraron un impacto significativo de los tratamientos de restricción hídrica. La

Tabla 1 muestra el volumen total de demanda de agua de referencia (ET0), el volumen de agua aplicado por el productor local en el tratamiento control (T0), y el volumen total aplicado en los tratamientos de riego deficitario, mientras que la Fig. 2 ilustra la profundidad acumulada de agua (mm) para cada tratamiento durante el riego, así como el porcentaje relativo a ET0.

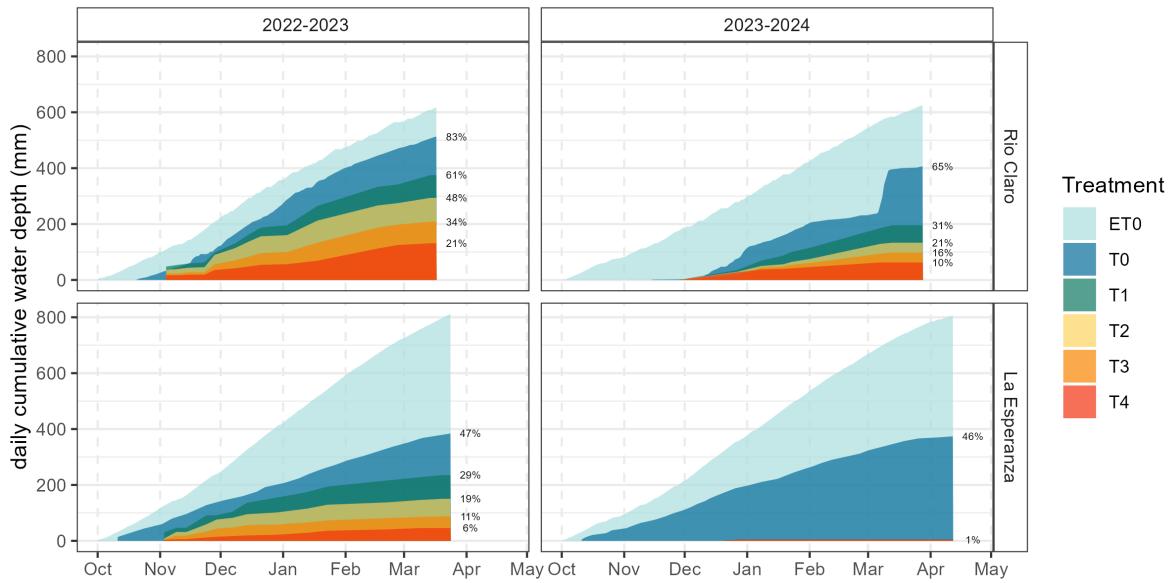


Figura 1.2: Figura 2. Variación de la profundidad acumulada diaria de agua (mm) aplicada por riego por tratamiento en comparación con la evapotranspiración de referencia (ET0). El punto de inicio para la acumulación de ET0 corresponde al primer día de riego para cada huerto y temporada.

Metodología y reporte 2022-2023

Los detalles metodológicos sobre la toma de muestras y el procesamiento de variables utilizadas en este estudio han sido descritos en el reporte “Efecto de estrategias de riego deficitario sobre la productividad y calidad de huertos de cerezos, variedad Regina”, elaborado por el Dr. Manuel Muñoz el 3 de diciembre de 2024. Dicho reporte abarca exclusivamente los resultados correspondientes a la temporada 2022-2023, mientras que los materiales y métodos para la temporada 2023-2024 siguen siendo los mismos.

Para revisar los procedimientos específicos empleados o analizar los resultados de la temporada 2022-2023 de manera independiente, se recomienda acceder al reporte completo en el siguiente [enlace](#).

Para desarrollar los resultados de producción y calidad de los frutos, se llevaron a cabo mediciones en las fechas y eventos de cosecha de cada sitio. Los resultados de producción y calidad que puede ser revisados en el reporte 2022-2023 corresponden a las fechas de cosecha del 23 de diciembre de 2022 en Río Claro y el 12 de diciembre de 2022 en La Esperanza. El reporte actual, en adición, muestra los resultados de la cosecha en la temporada 2023-2024 solo para La Esperanza, con fecha el 12 de diciembre del 2023.

Parte II

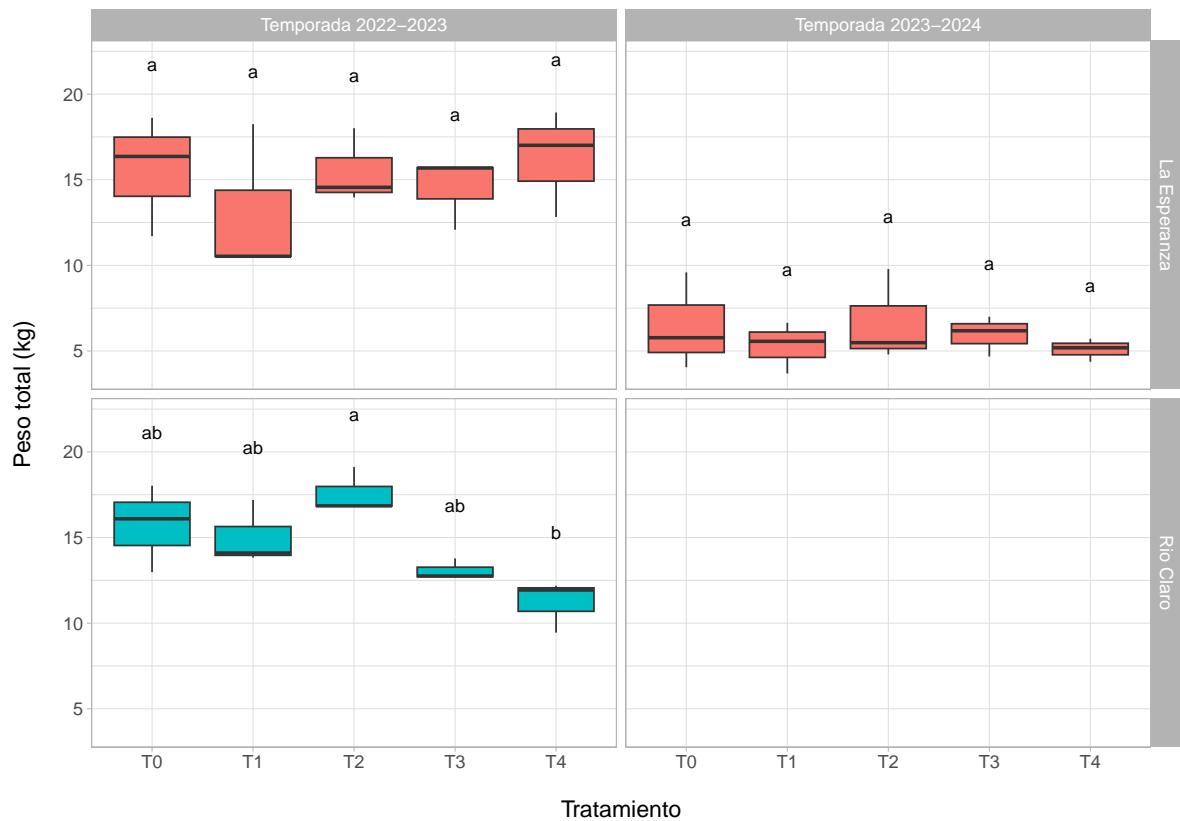
Producción

2 Producción

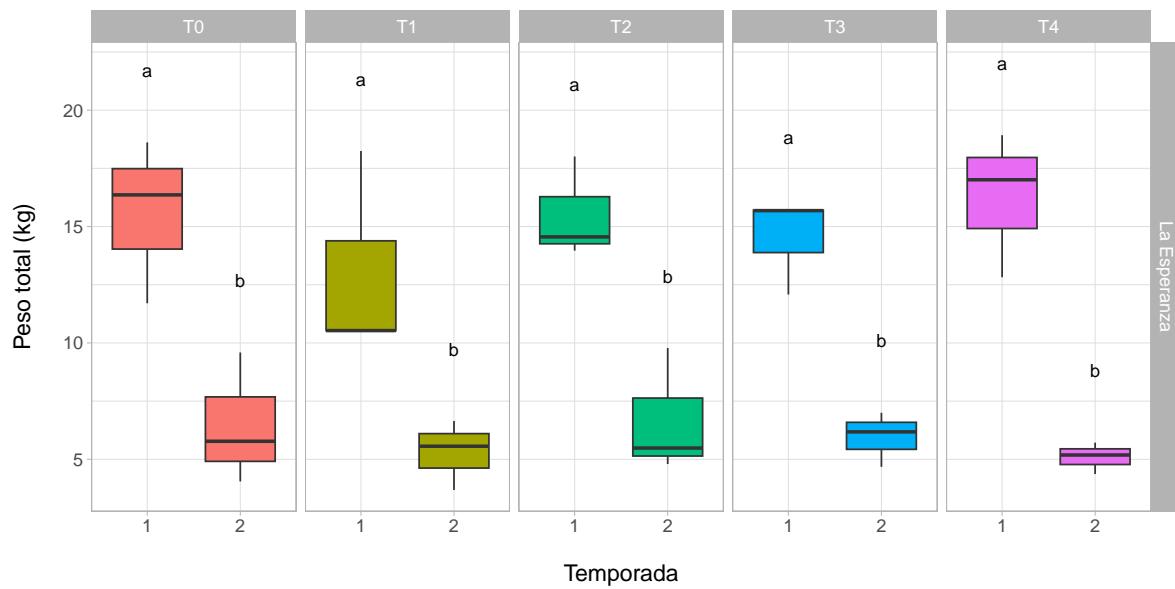
2.1 Peso total

En La Esperanza, el peso total de la producción fue menor en la temporada 2023-2024 en comparación con 2022-2023, con una reducción general en todos los tratamientos, incluido el control (T0). En ambos años, T2 y T4 presentaron valores ligeramente superiores en comparación con los demás tratamientos con déficit. En Río Claro, T2 mostró los valores más altos, mientras que T4 presentó los más bajos.

3 Por tratamiento

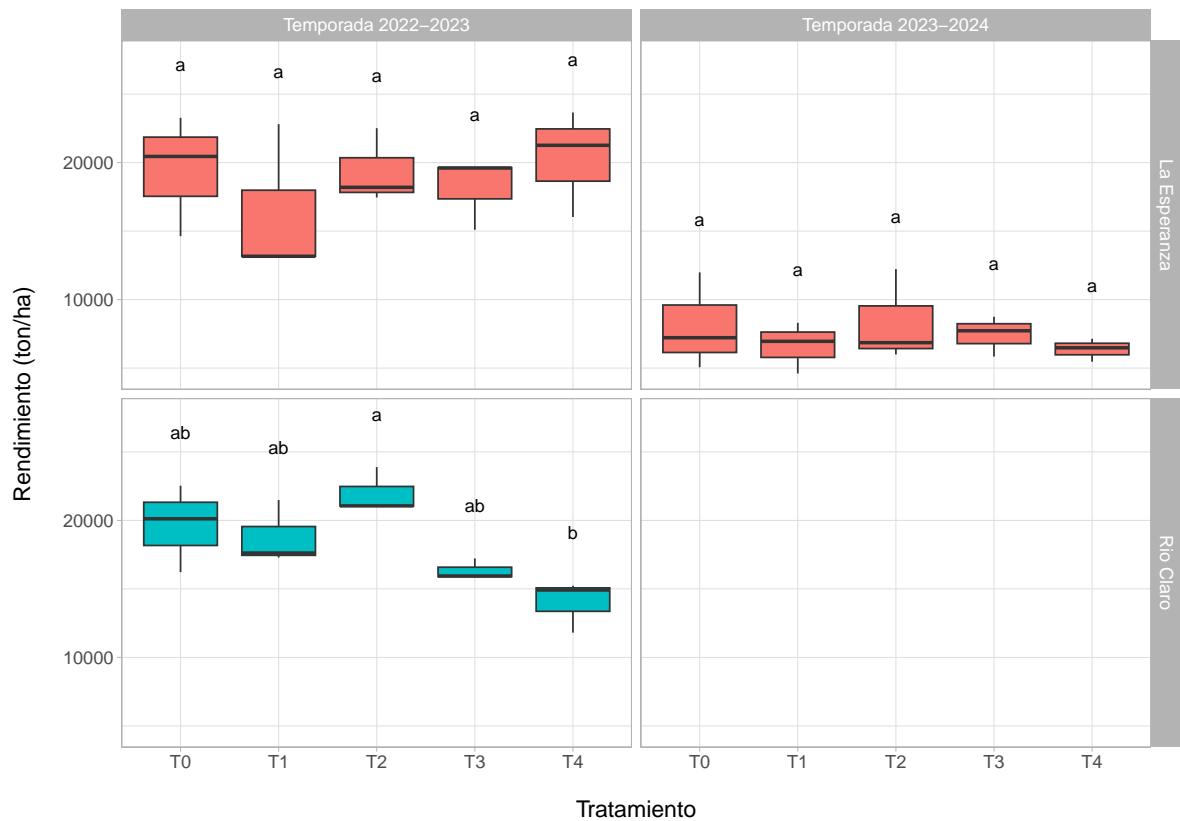


4 Por temporada

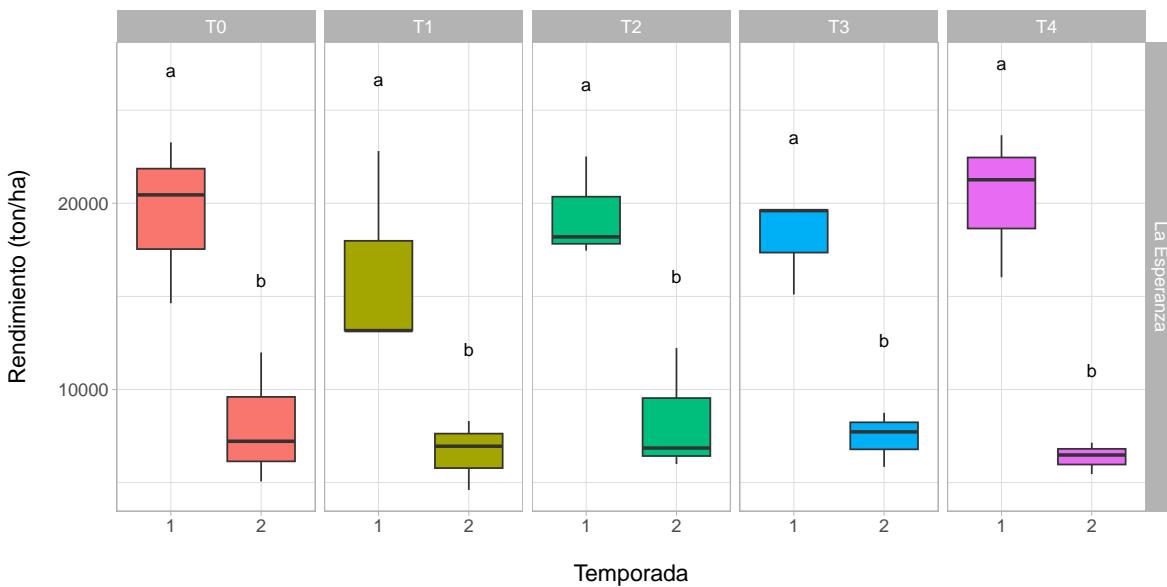


4.1 Rendimiento

5 Por tratamiento



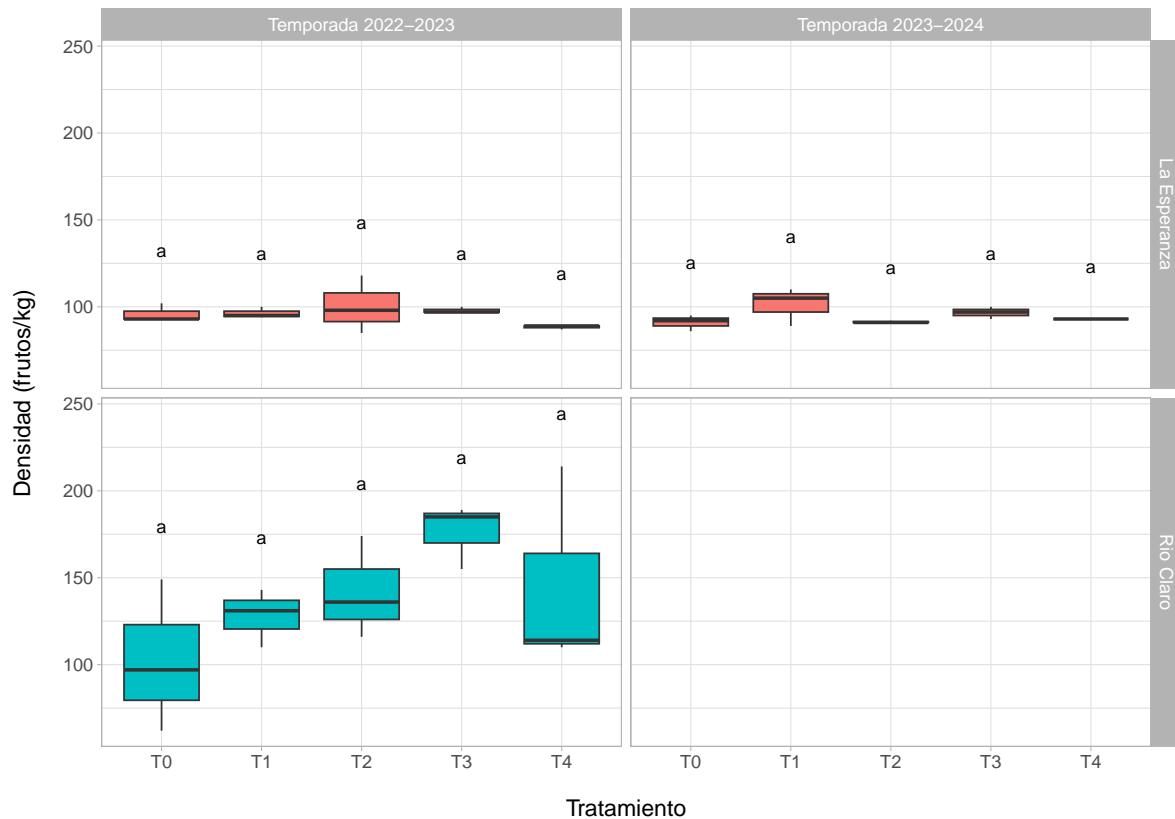
6 Por temporada



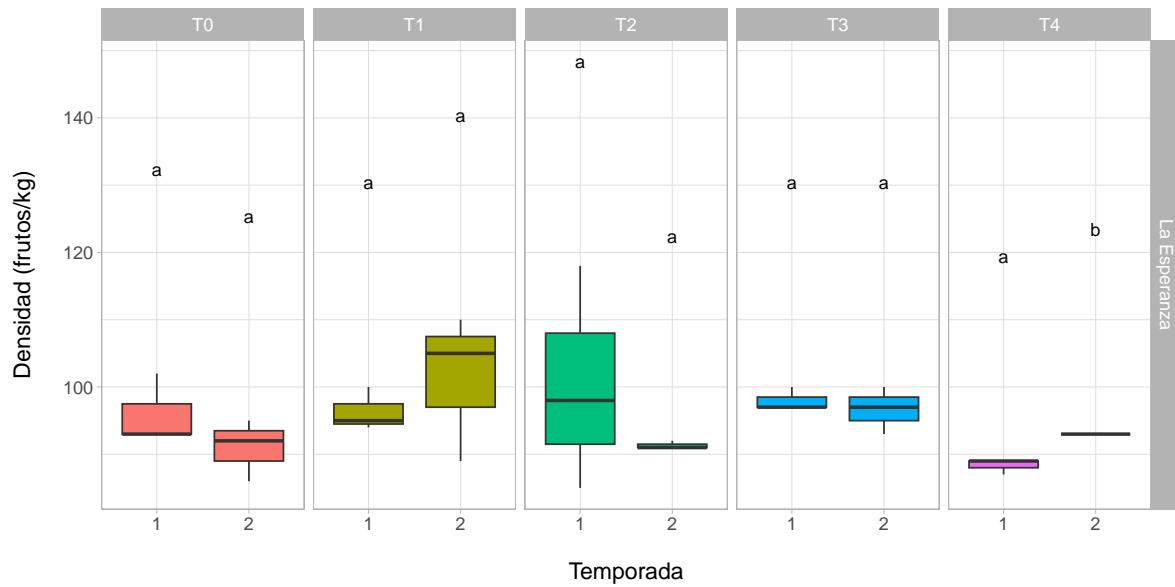
6.1 Densidad

Los resultados en la densidad muestran que, en La Esperanza, los valores fueron relativamente similares entre tratamientos y entre las temporadas, sin variaciones destacadas, lo que también ocurrió en T0. En Río Claro, se observaron mayores diferencias durante la temporada 2022-2023, donde T3 presentó valores más altos, superando los 200 frutos/kg en las tres unidades.

7 Por tratamiento



8 Por temporada



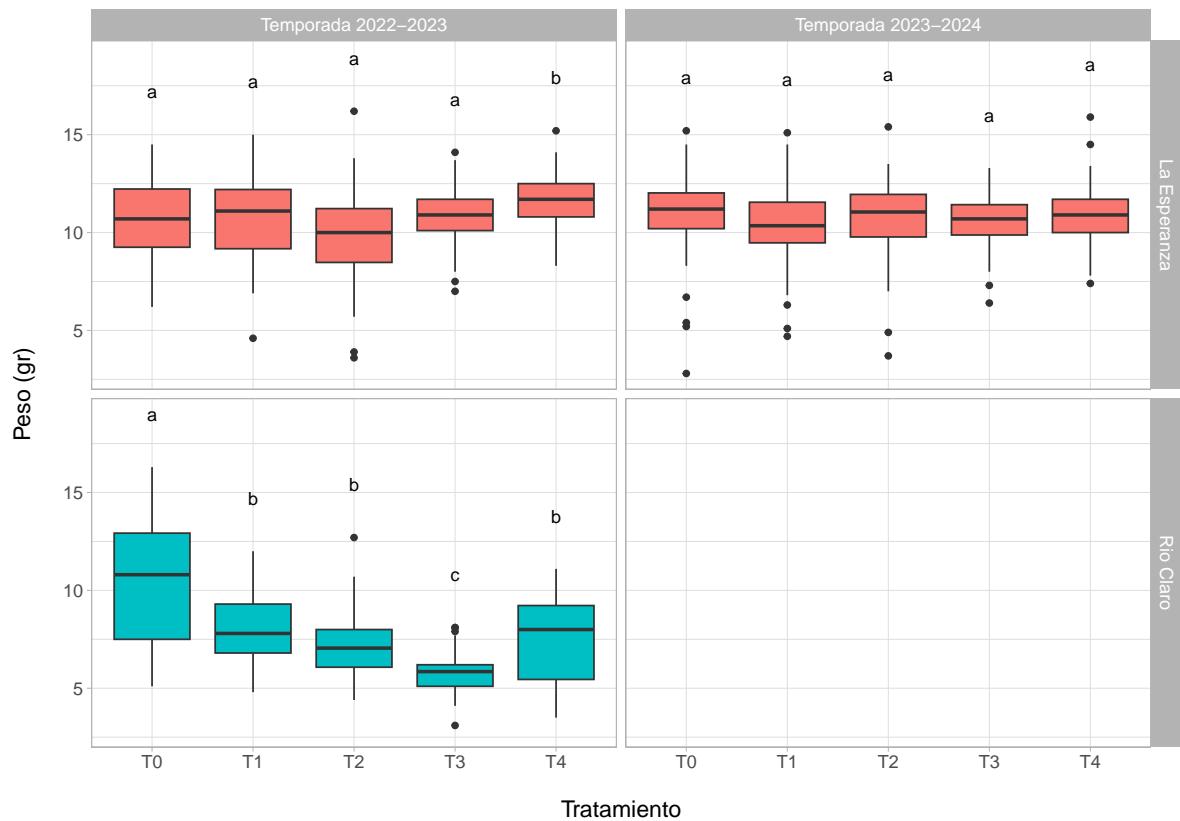
9 Calidad

9.1 Apariencia

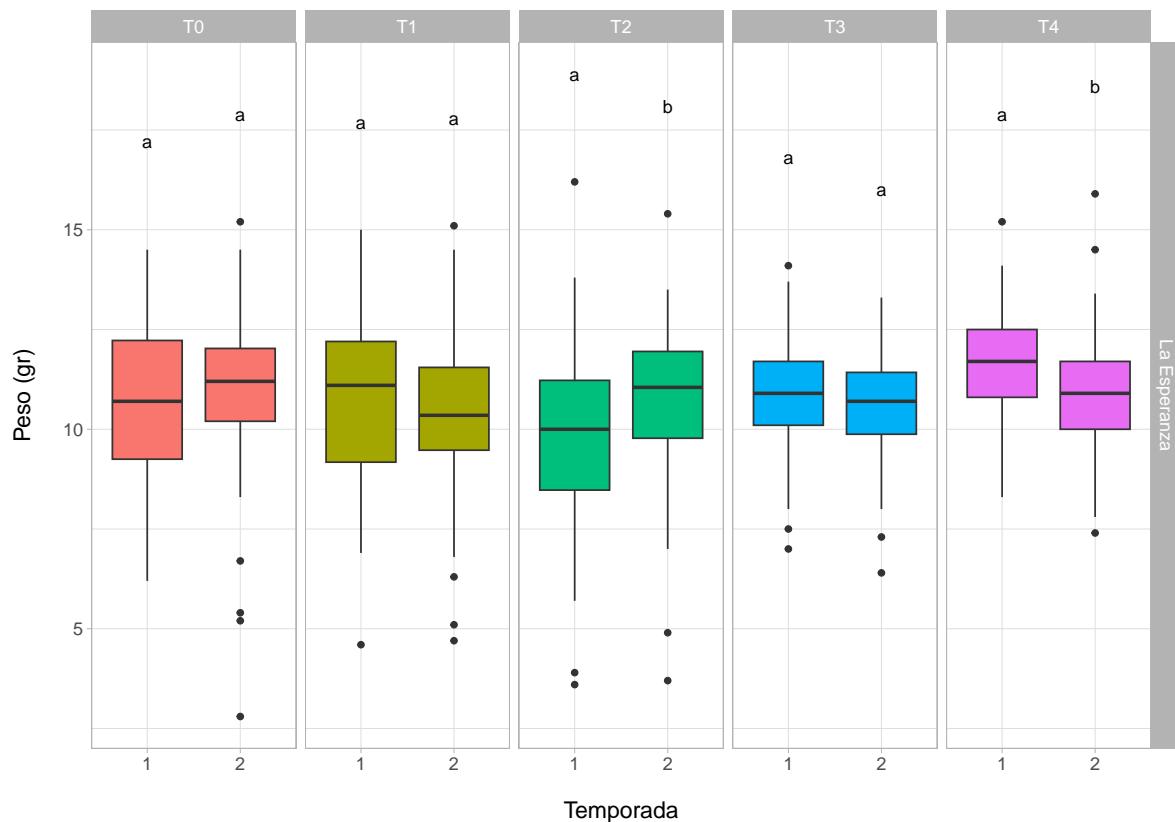
9.1.1 Peso

En La Esperanza, no se observaron diferencias significativas en el peso de las cerezas entre tratamientos en ninguna de las temporadas, salvo por T4 en la temporada 2022-2023 donde el peso fue mayor. En contraste, en Río Claro durante la temporada 2022-2023, el peso del fruto disminuyó significativamente en los tratamientos con RDC respecto al control (T0), con la reducción más pronunciada en T3. T4 mostró una recuperación parcial, aunque sin alcanzar los valores del control.

10 Por tratamiento



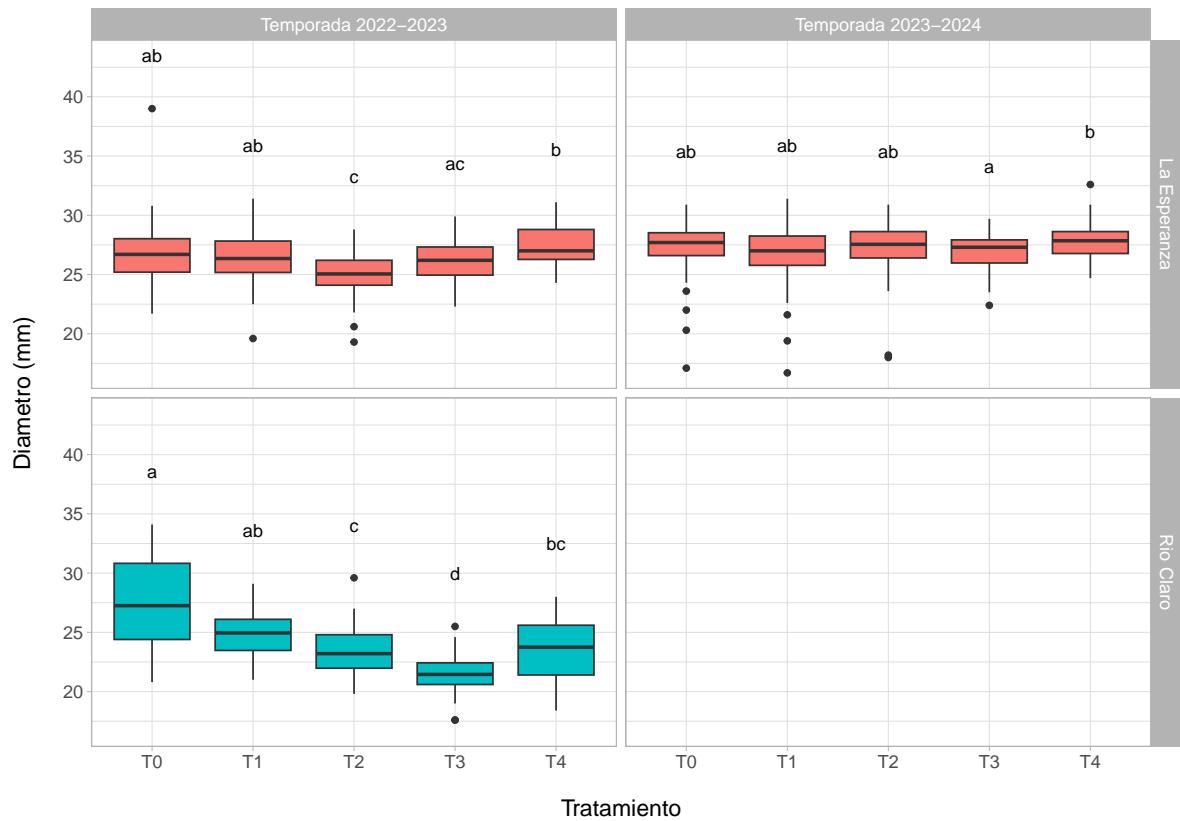
11 Por temporada



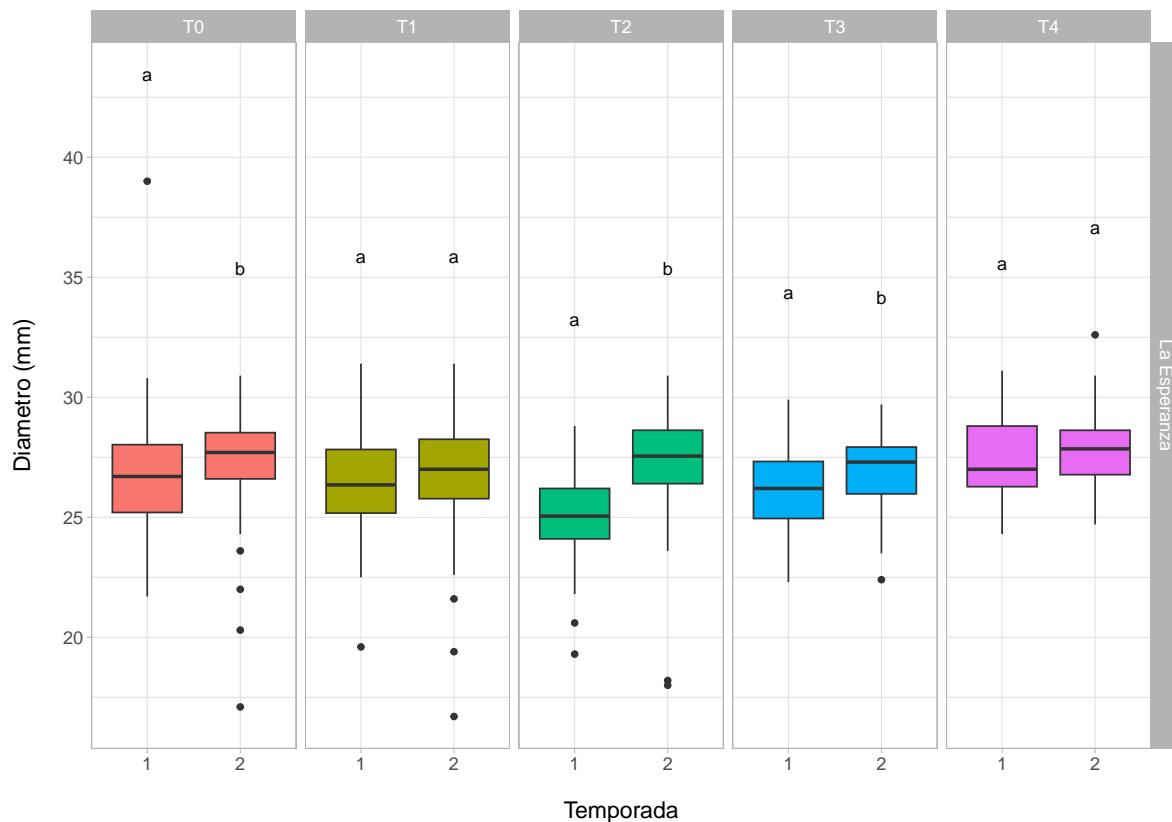
11.0.1 Diametro

En La Esperanza, los tratamientos con RDC mostraron algunas diferencias significativas en el diámetro del fruto en 2022-2023, donde T2 presentó menores valores que T0, mientras que T4 tuvo diámetros ligeramente mayores que T2 y T3. En 2023-2024, no hubo diferencias significativas entre tratamientos, excepto por T4, que mostró un leve incremento respecto al resto. En Río Claro, el RDC redujo significativamente el diámetro del fruto en 2022-2023, con T3 mostrando los menores valores y diferencias significativas con T0, mientras que T2 y T4 presentaron valores intermedios.

12 Por tratamiento



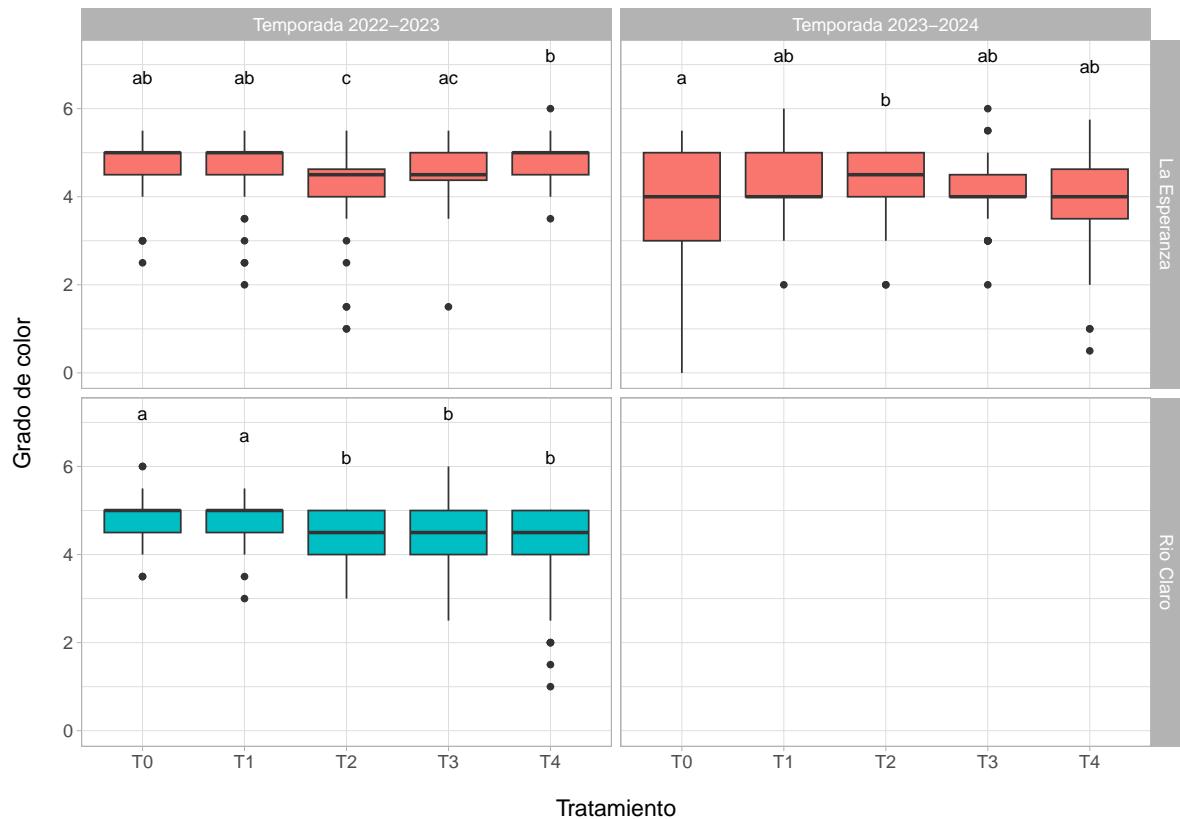
13 Por temporada



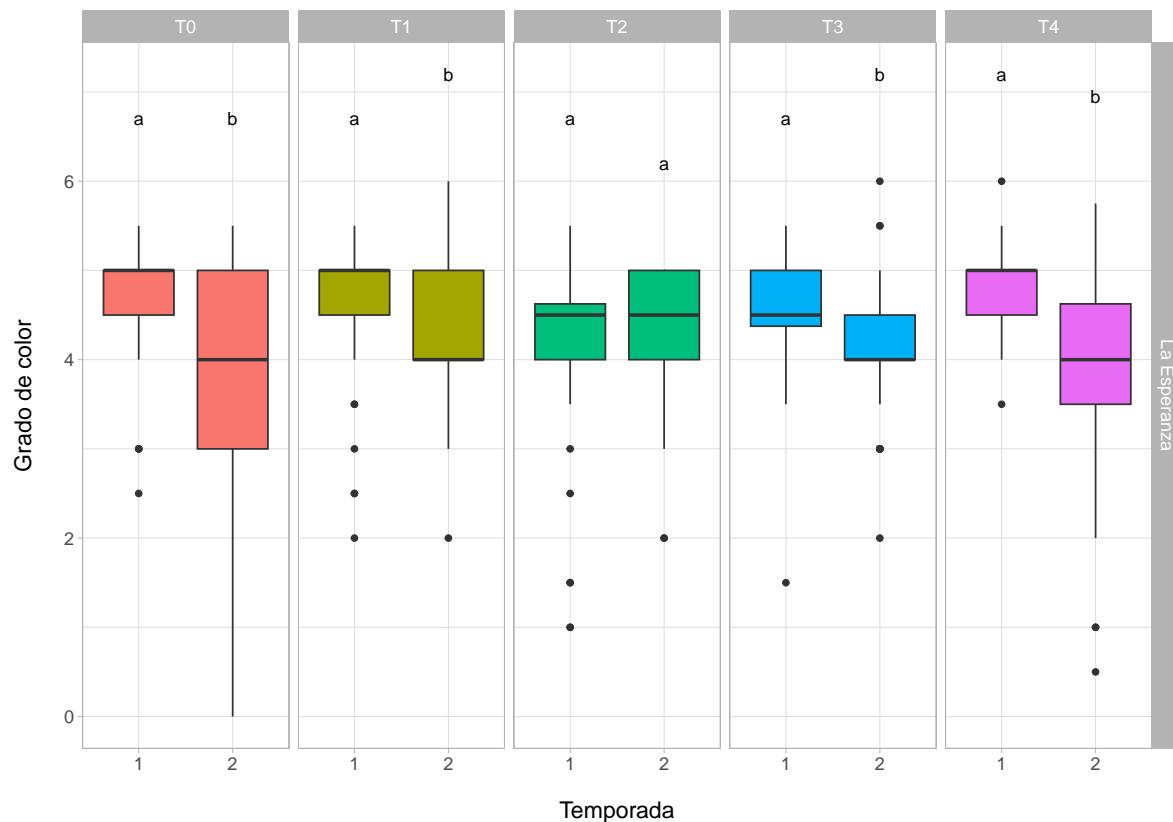
13.1 Color

En La Esperanza, el grado de color presentó diferencias significativas en 2022-2023, con T2 mostrando valores menores que T0 y T4, mientras que T3 tuvo valores intermedios. En 2023-2024, T0 mostró valores inferiores a T3 y T4, sin diferencias entre los demás tratamientos. En Río Claro, en 2022-2023, T2, T3 y T4 presentaron valores menores que T0 y T1, sin diferencias entre ellos.

14 Por tratamiento



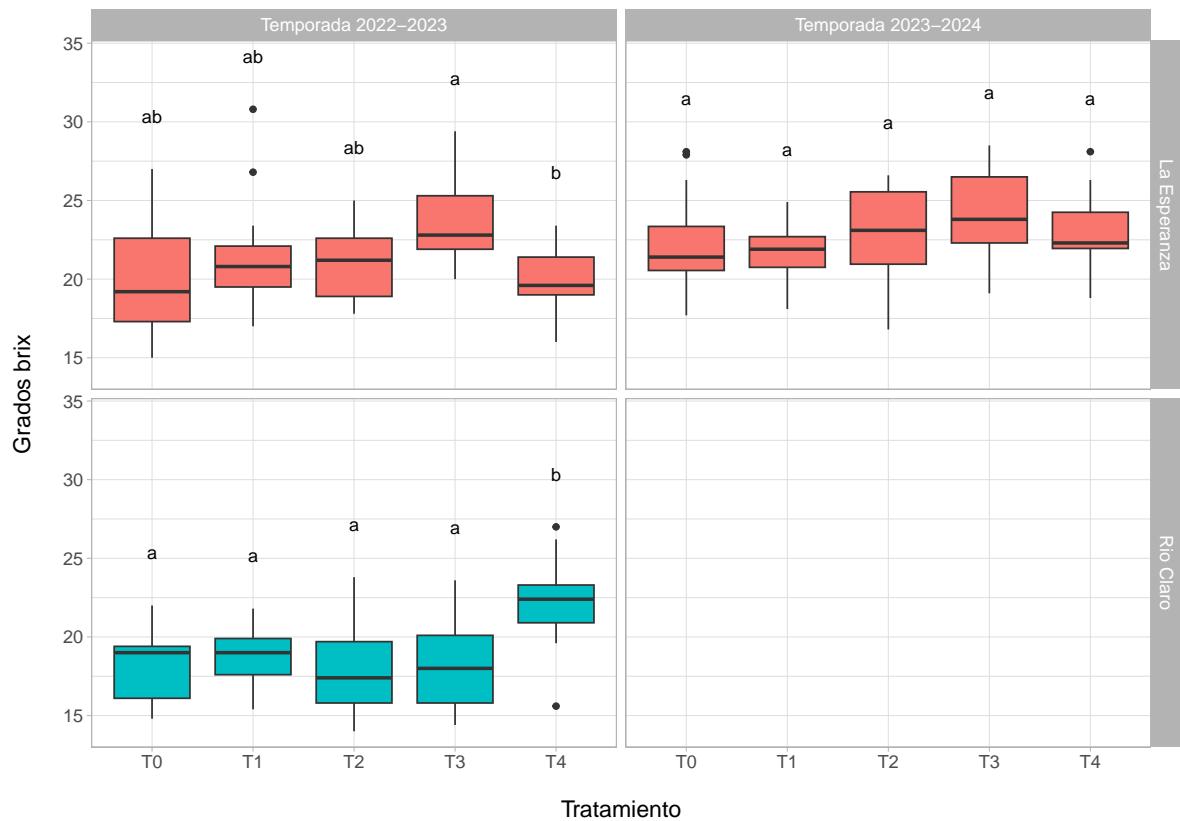
15 Por temporada



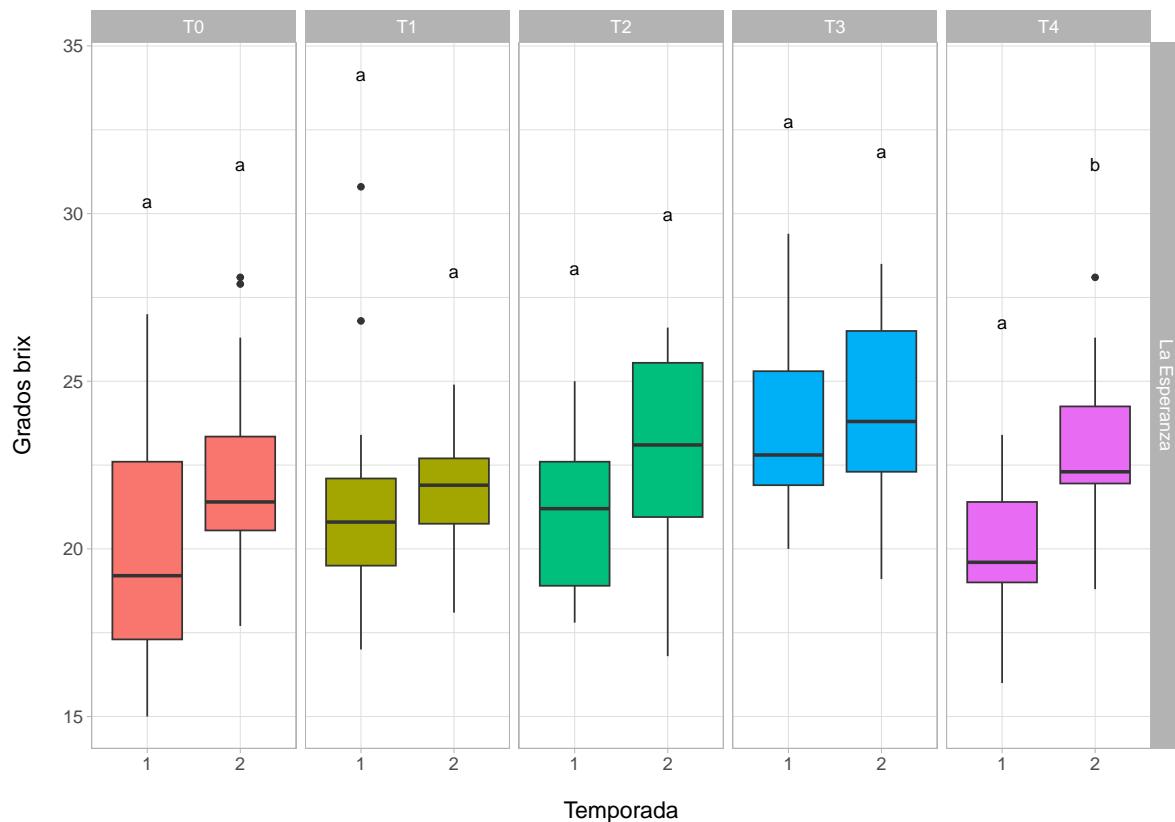
15.1 Contenido de azúcar

En La Esperanza, los sólidos solubles presentaron diferencias significativas solo en la temporada 2022-2023, con T3 mostrando los mayores valores y T4 los menores. En 2023-2024, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. En Río Claro, en 2022-2023, T4 presentó valores significativamente mayores que el resto de los tratamientos, los cuales no mostraron diferencias entre sí.

16 Por tratamiento

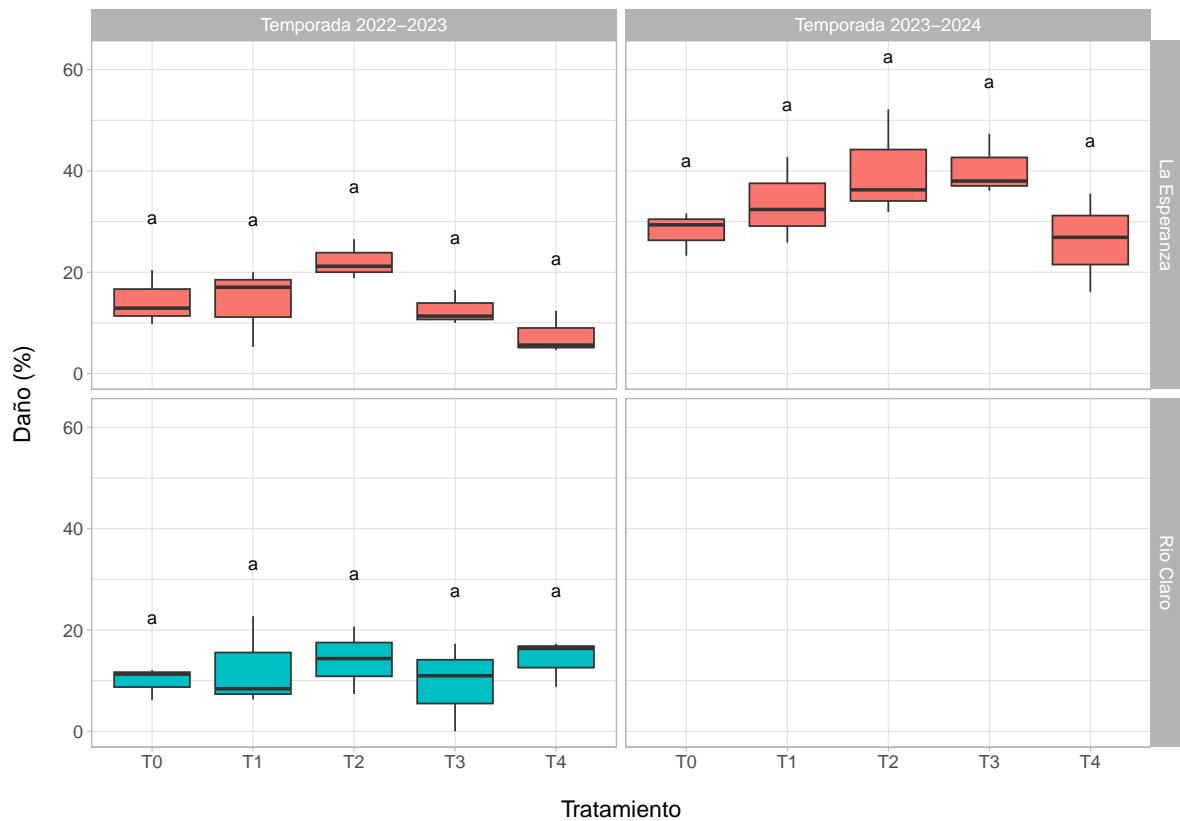


17 Por temporada

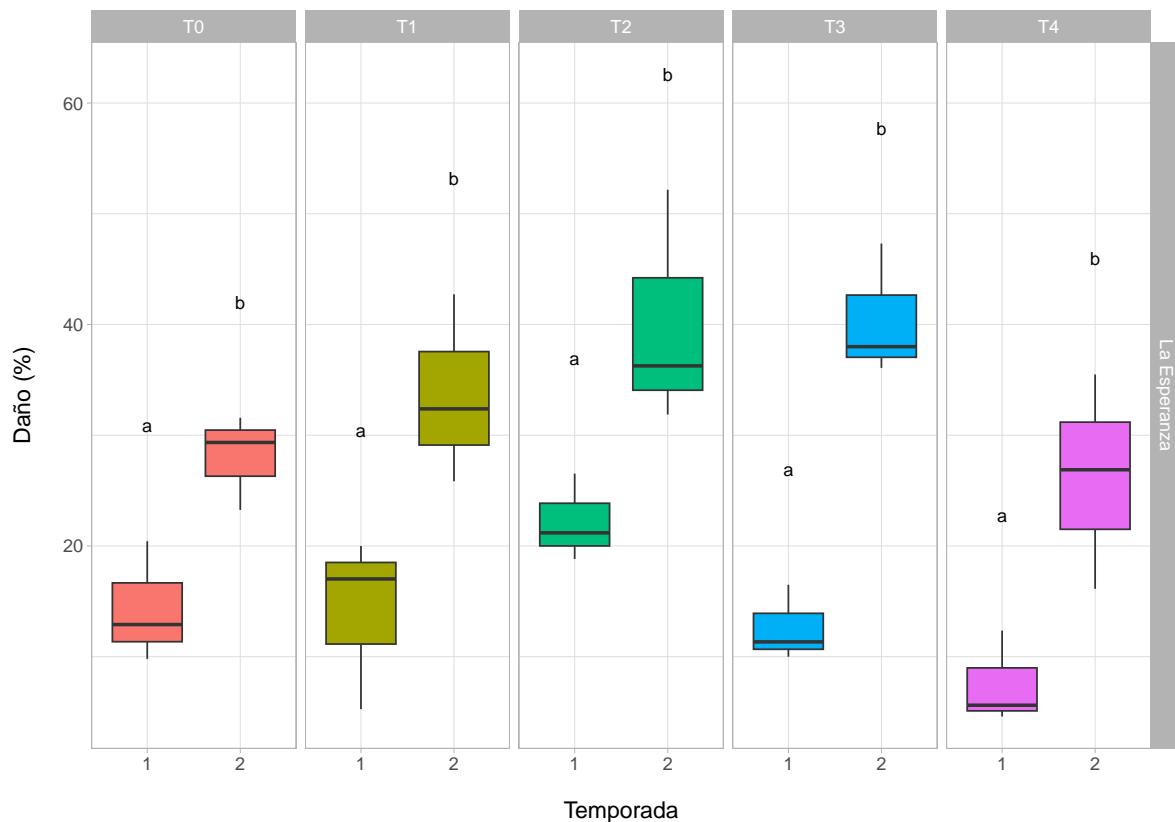


17.1 Daño

18 Por tratamiento



19 Por temporada



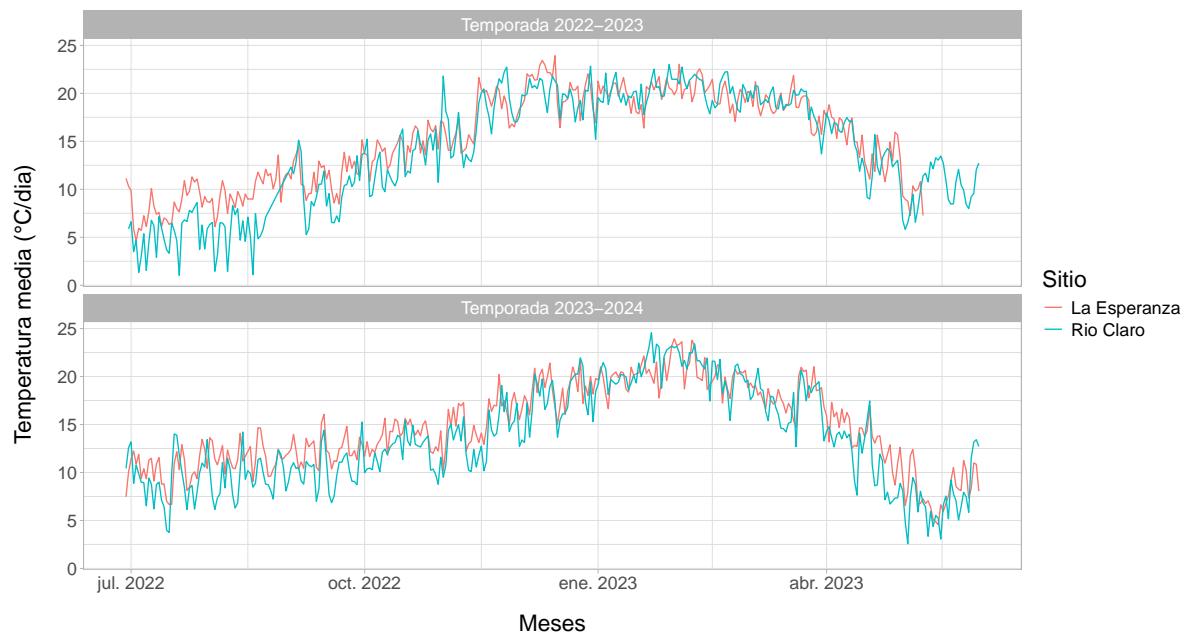
Parte III

Variables meteorológicas

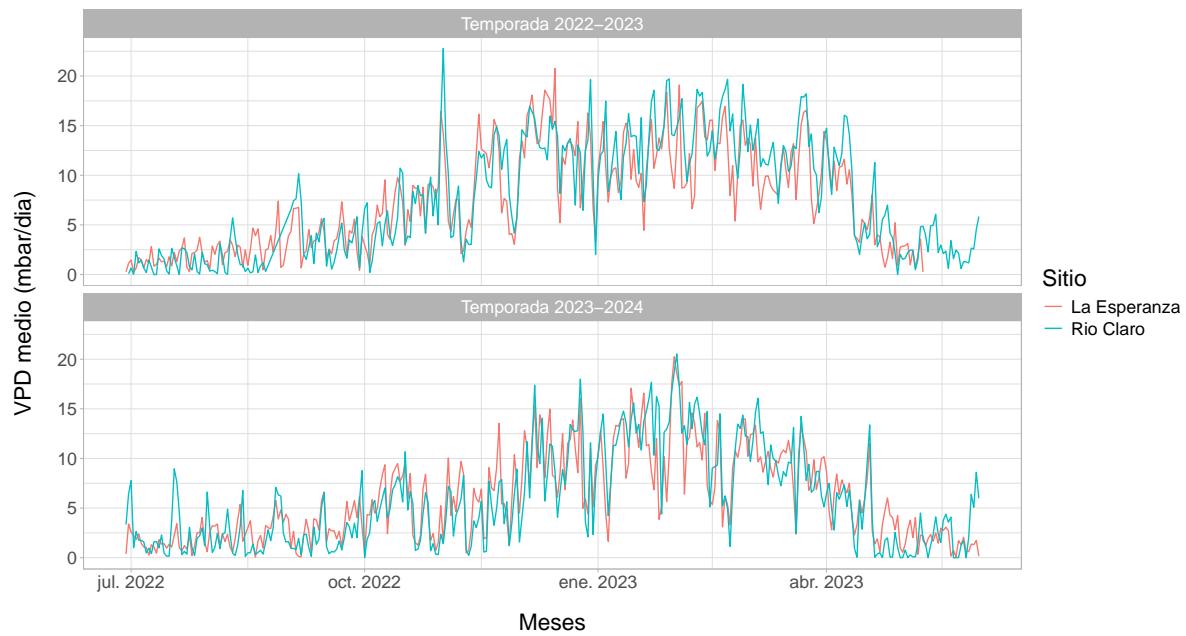
20 Clima

Las variables climáticas fueron obtenidas de las estaciones meteorológicas de Garces Fruits ubicadas en ambos sitios.

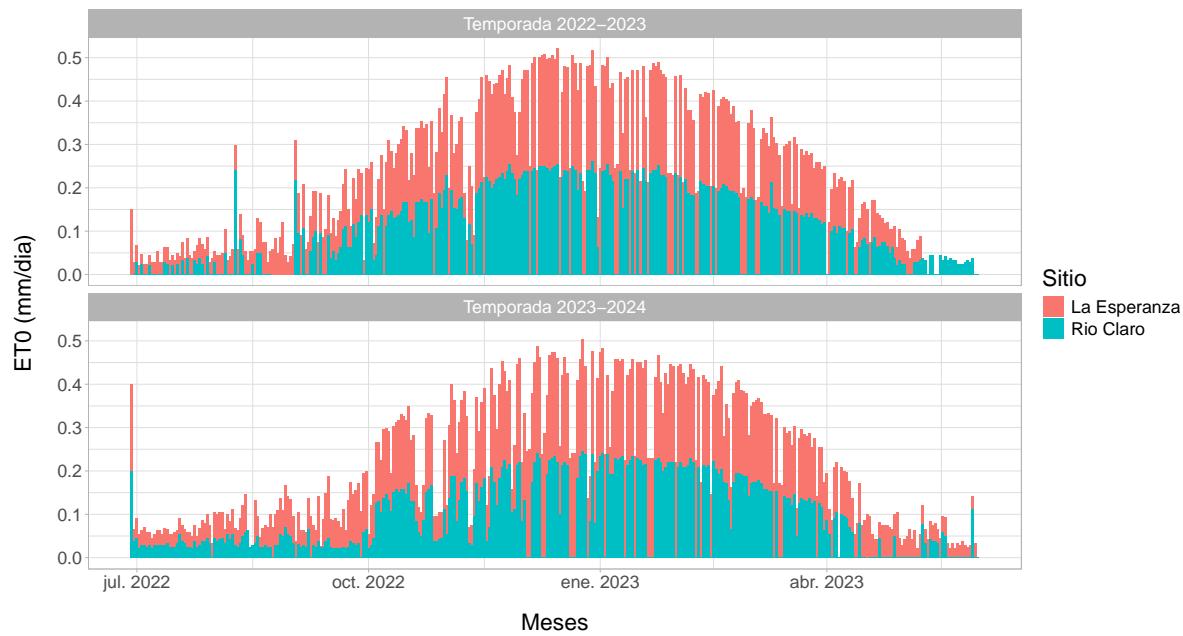
21 Temperatura



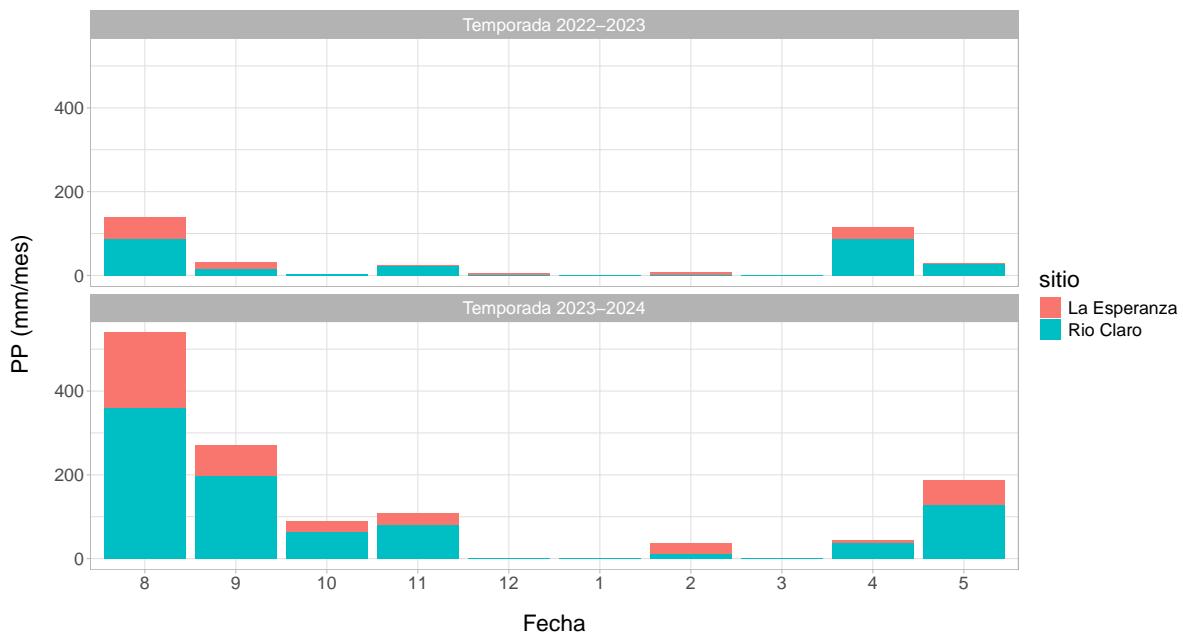
22 Déficit de presión de vapor (VPD)



23 Evapotranspiración de referencia (ET0)

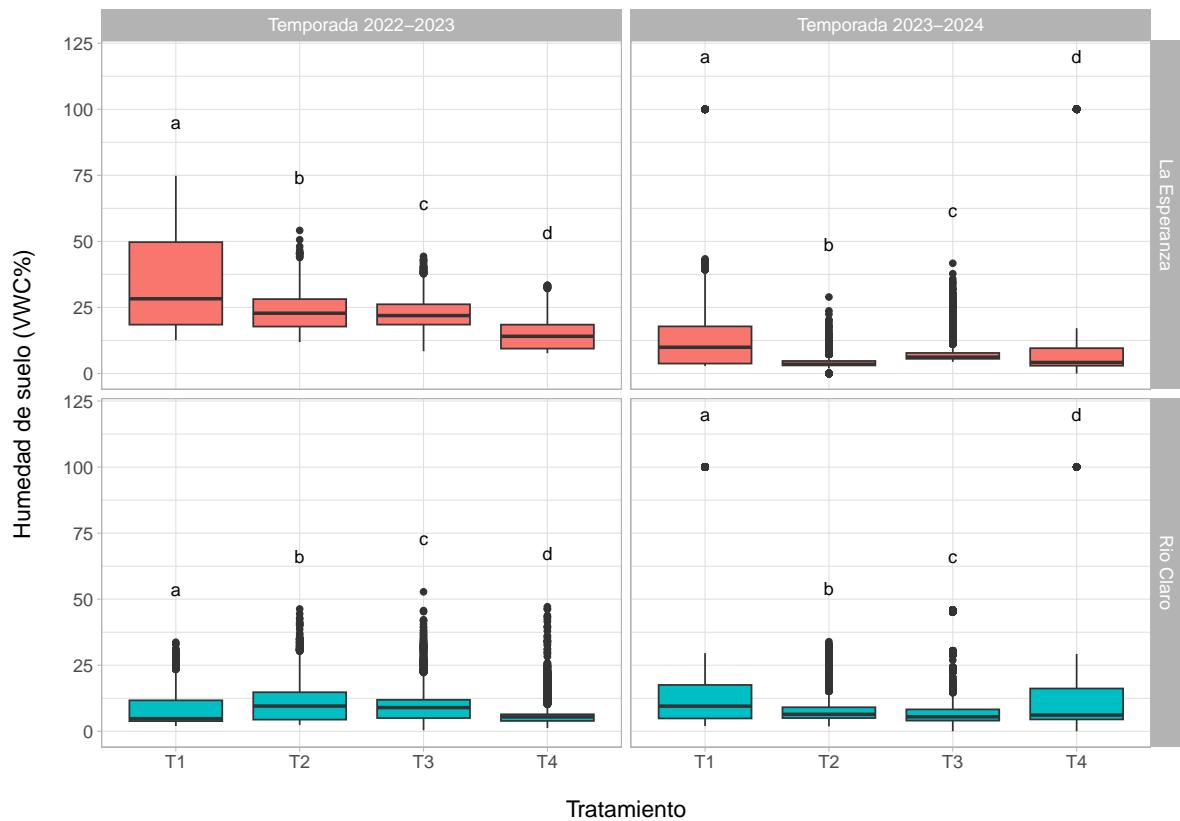


24 Precipitación

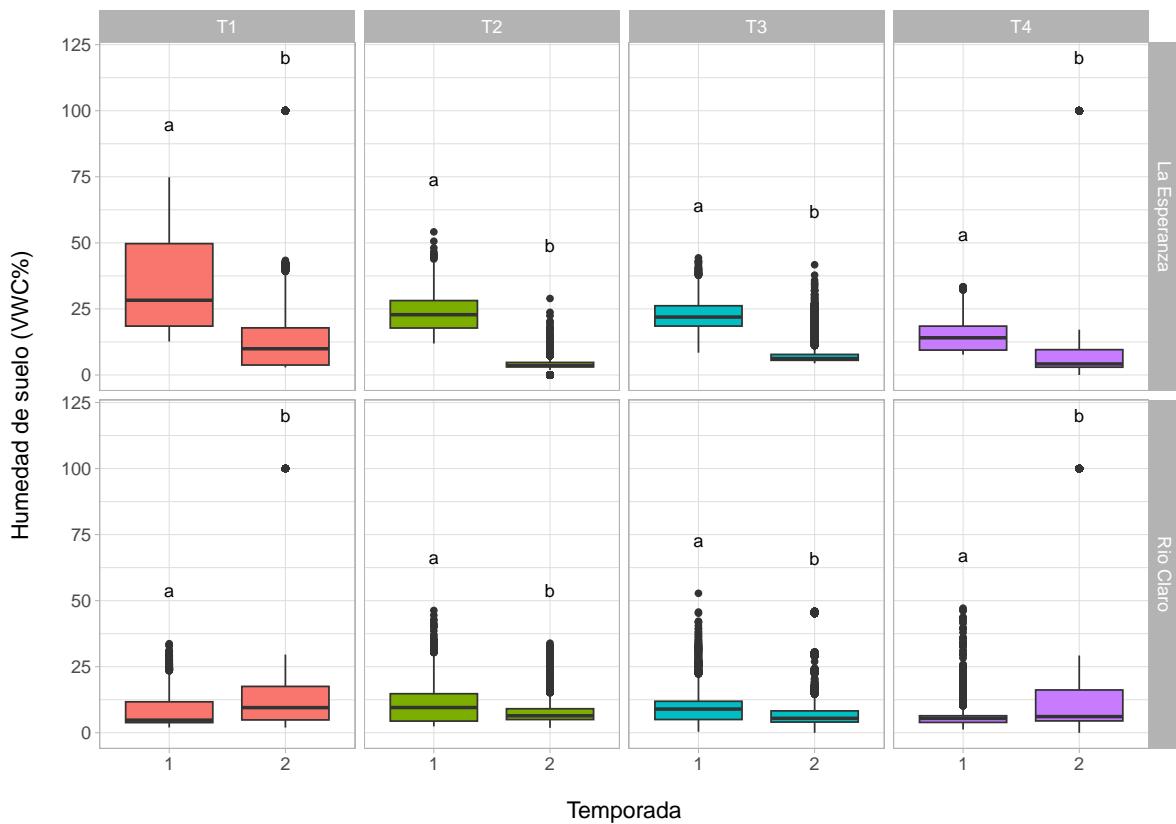


25 Humedad de suelo

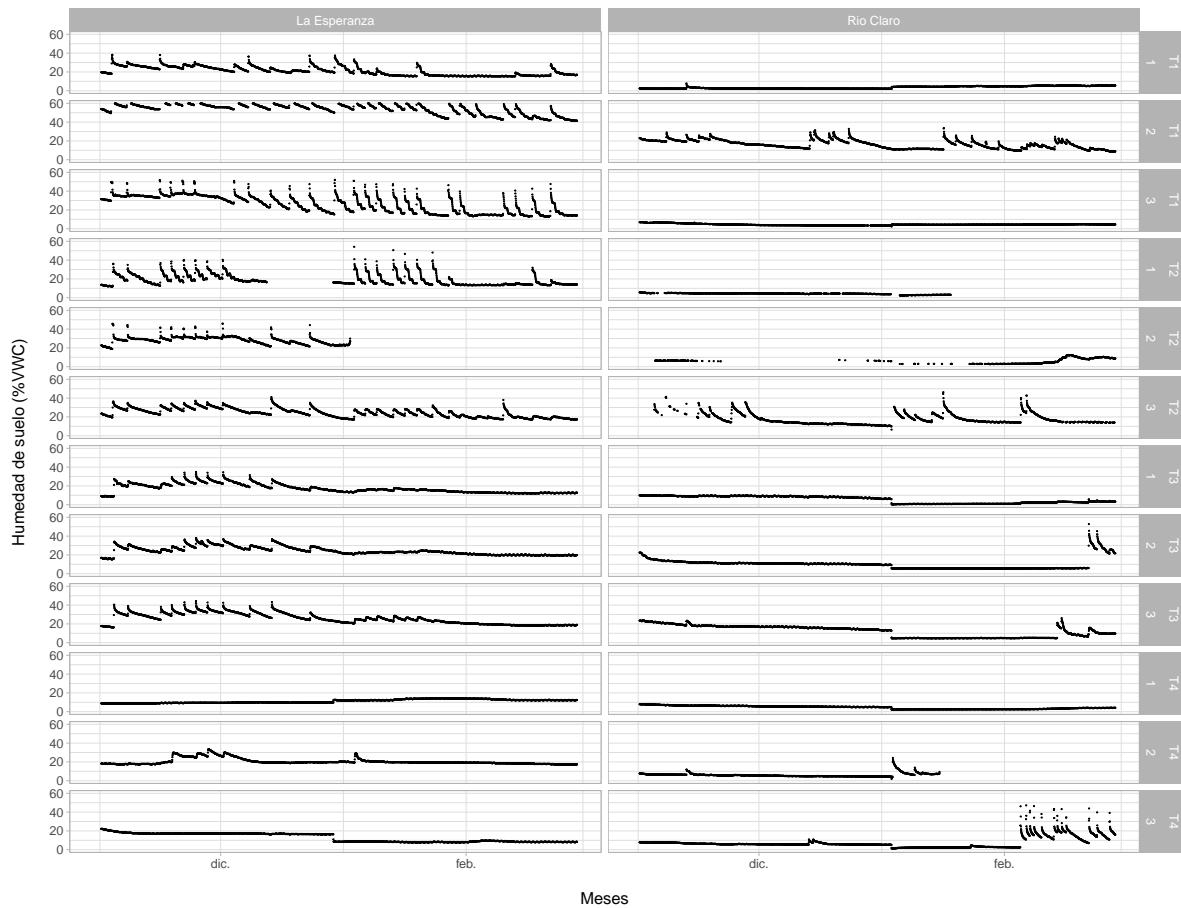
26 Por tratamiento



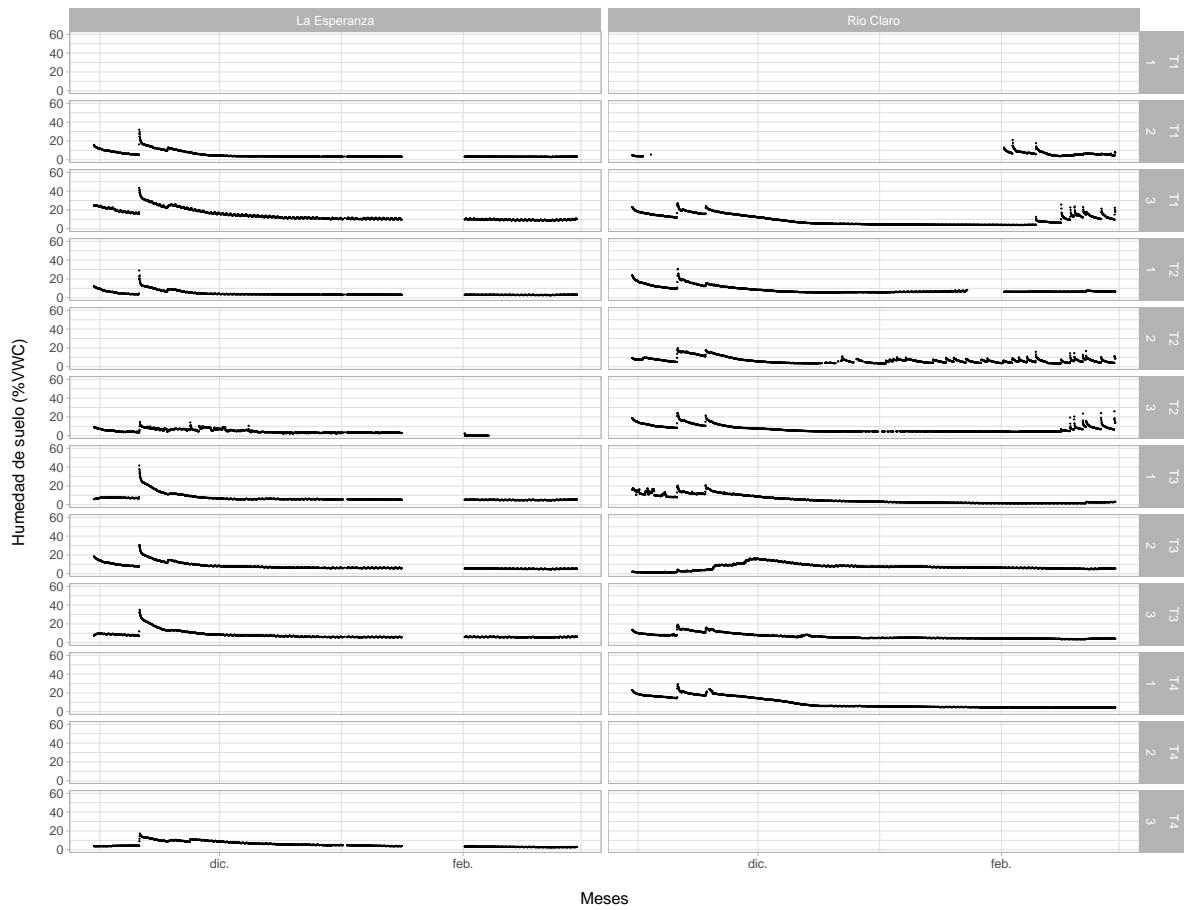
27 Por temporada



28 Serie temporal 2022-2023



29 Serie temporal 2023-2024



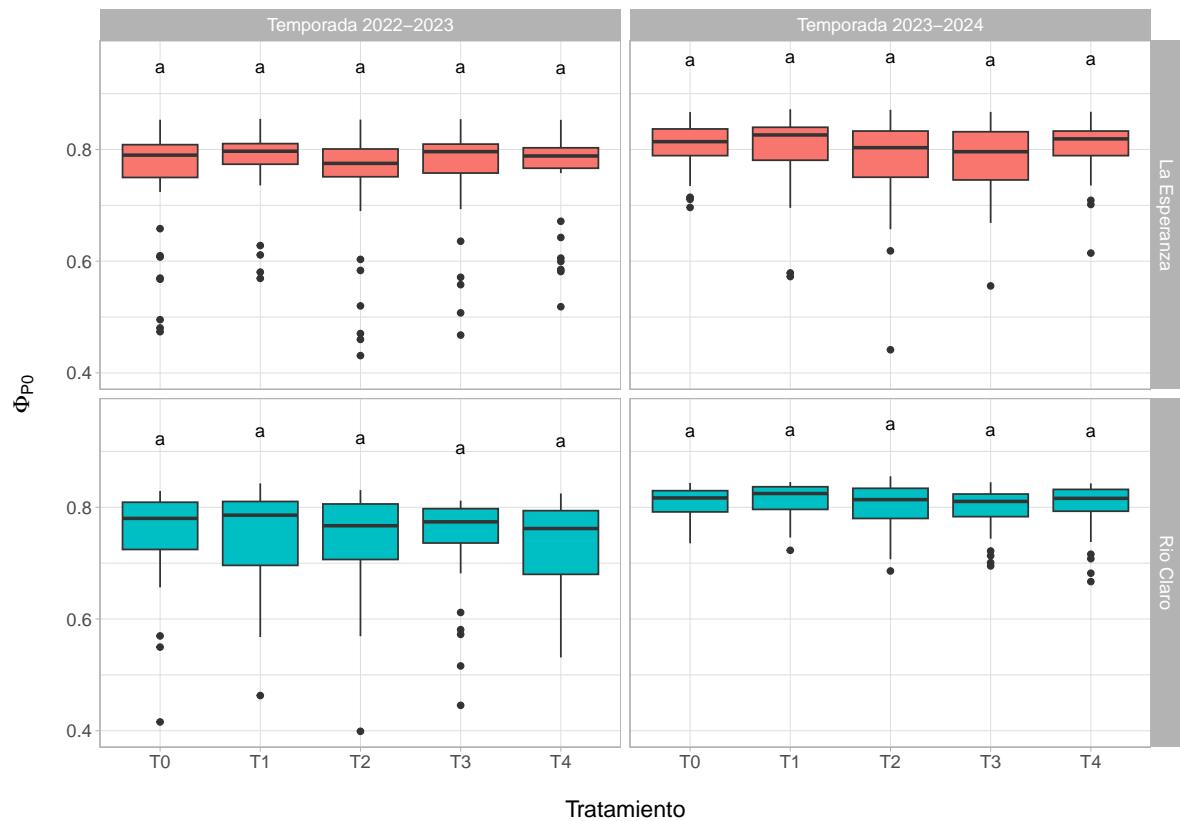
Parte IV

Parámetros fisiológicos

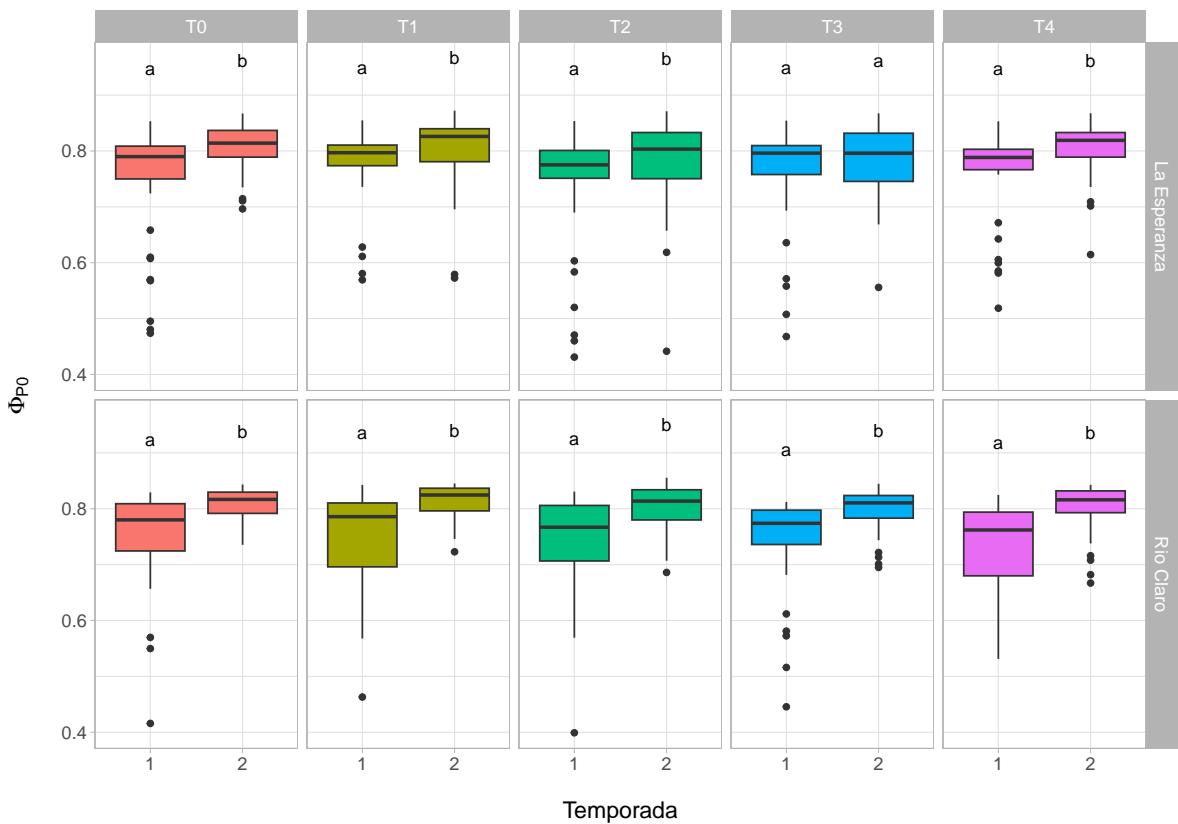
30 Parámetros fisiológicos

30.1 Fluorescencia

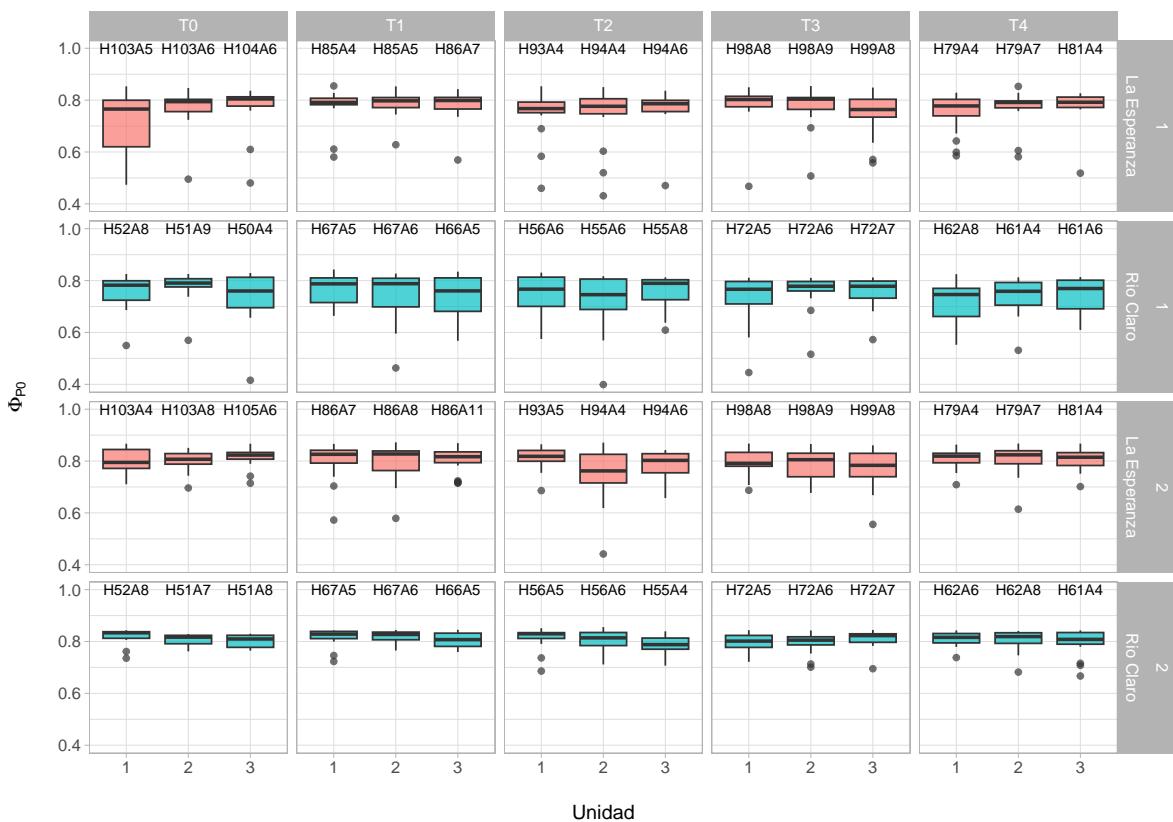
31 Por tratamiento



32 Por temporada

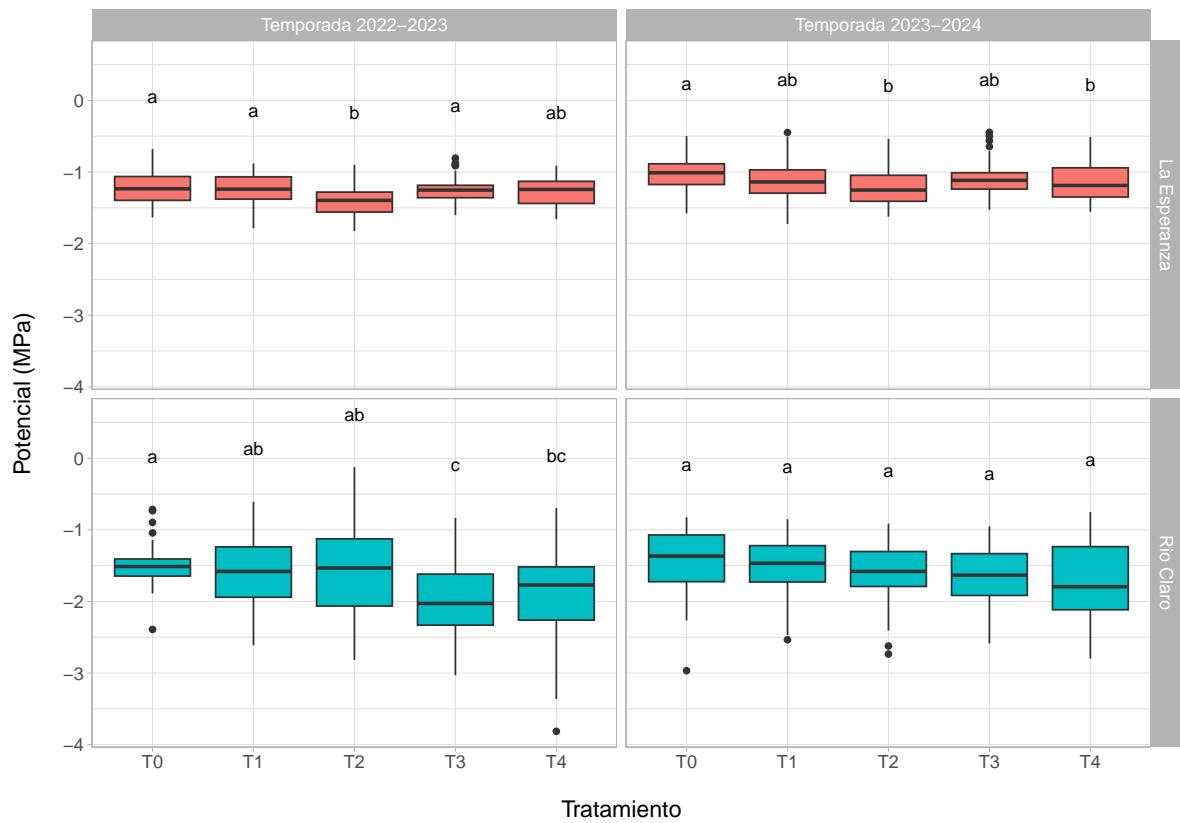


33 Series temporales

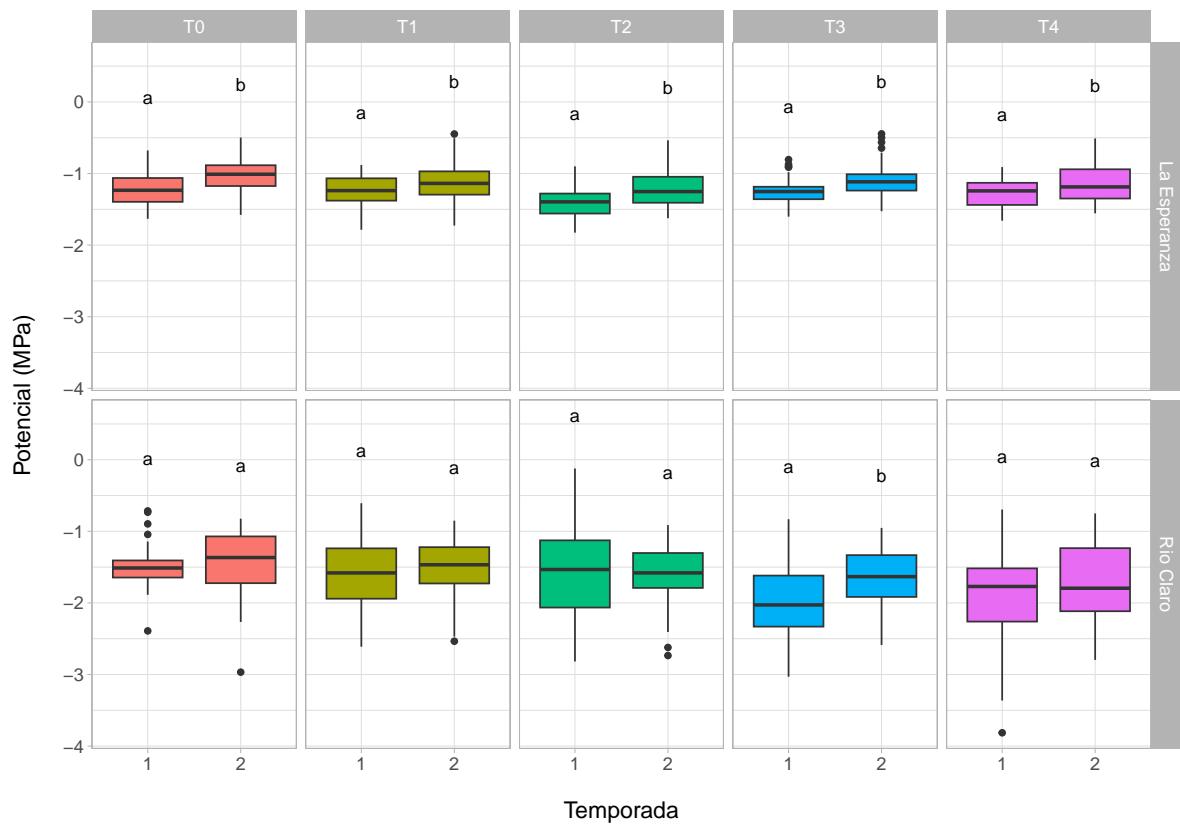


33.1 Potencial

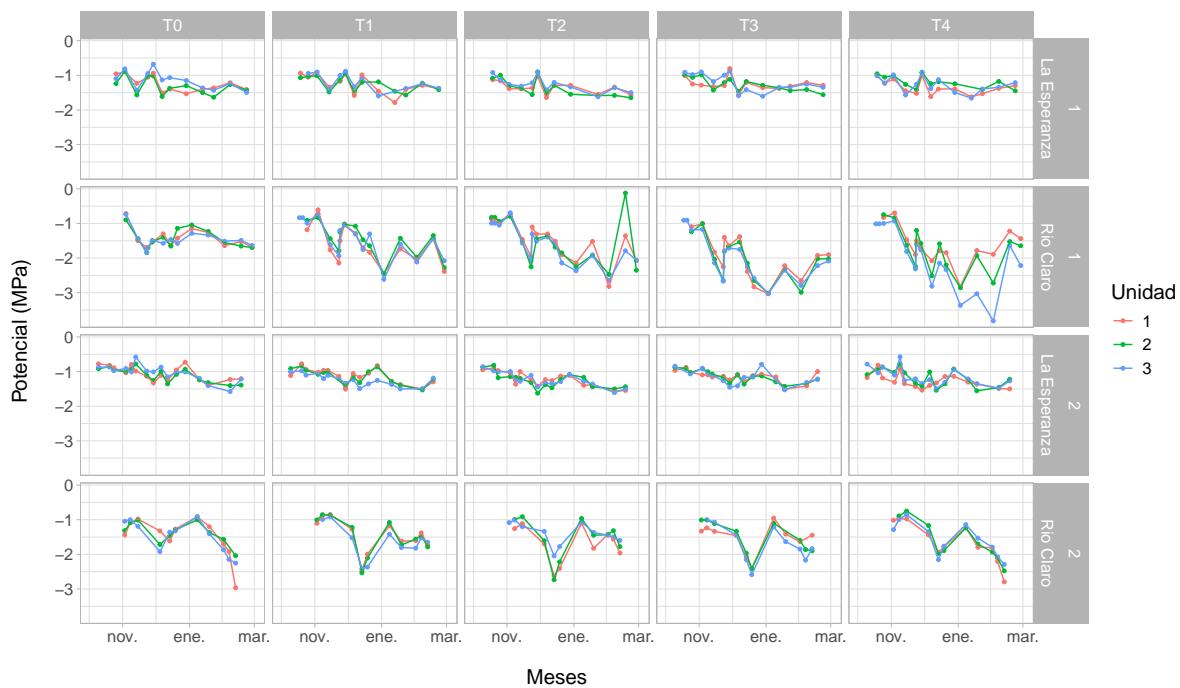
34 Por tratamiento



35 Por temporada

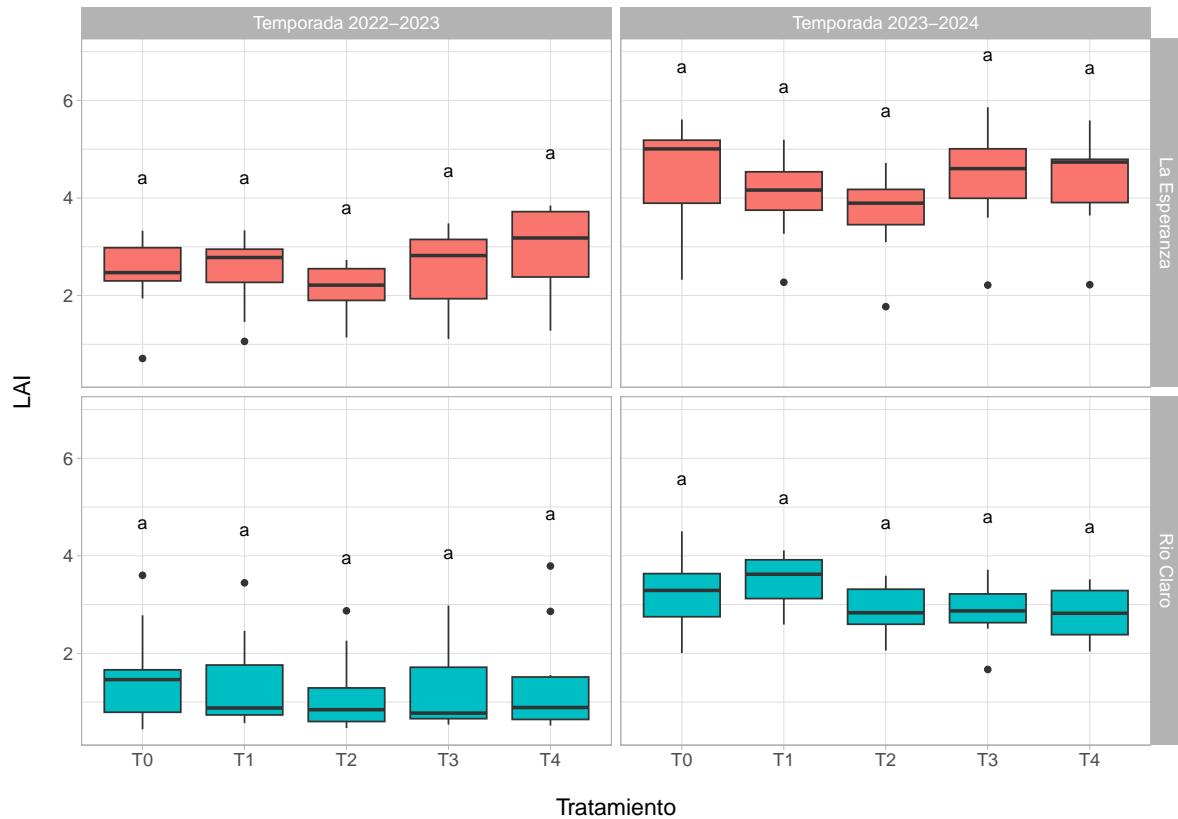


36 Serie temporal

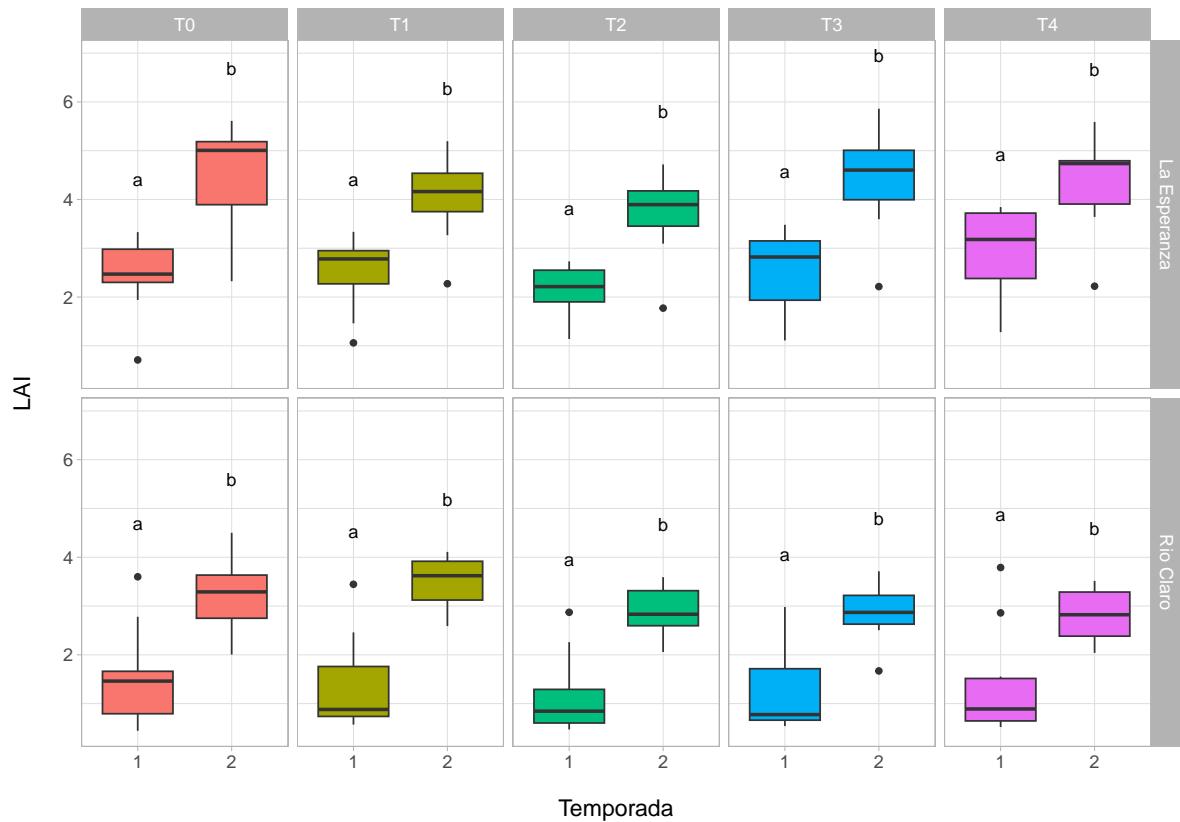


36.1 LAI

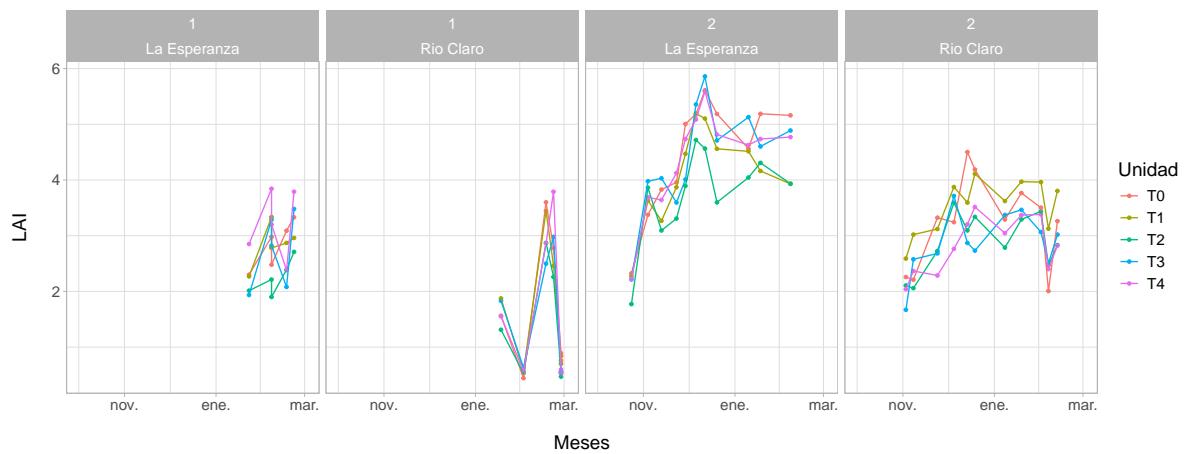
37 Por tratamiento



38 Por temporada



39 Serie temporal



40 Curvas Presión-volumen

Los datos utilizados para las curvas Presión-volumen corresponden a mediciones de potencial hídrico xilemático y peso en hojas de distintas unidades de los tratamientos experimentales, según la metodología descrita por Halbritter et al. (2020). El punto de pérdida de turgor (TLP) se estima como el último punto de la curva del Ψ inverso en función del RWD ($1 - \text{RWC}$) antes de comenzar su fracción lineal, como se muestra en la siguiente figura.

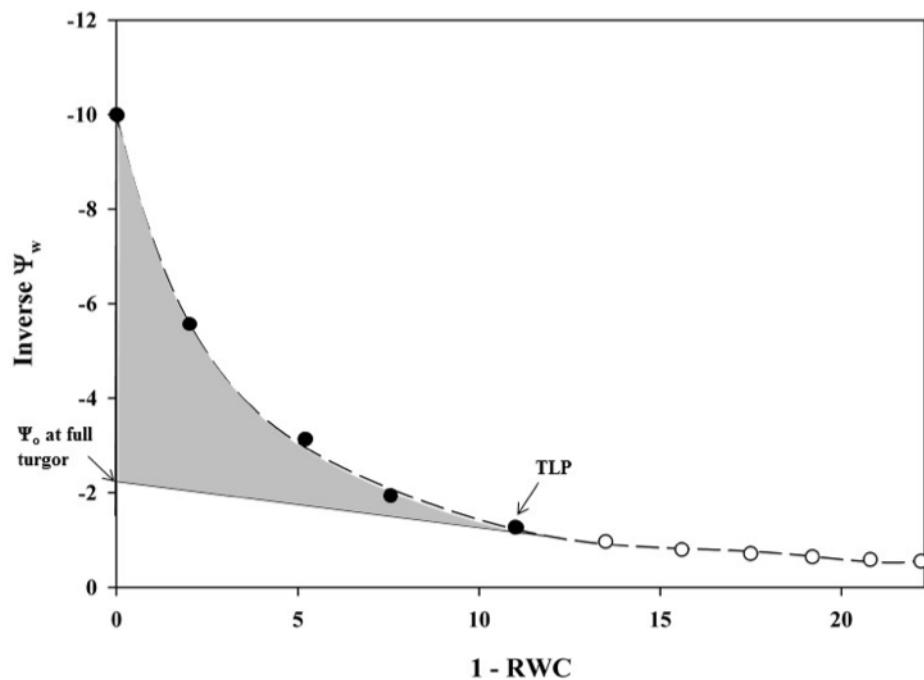
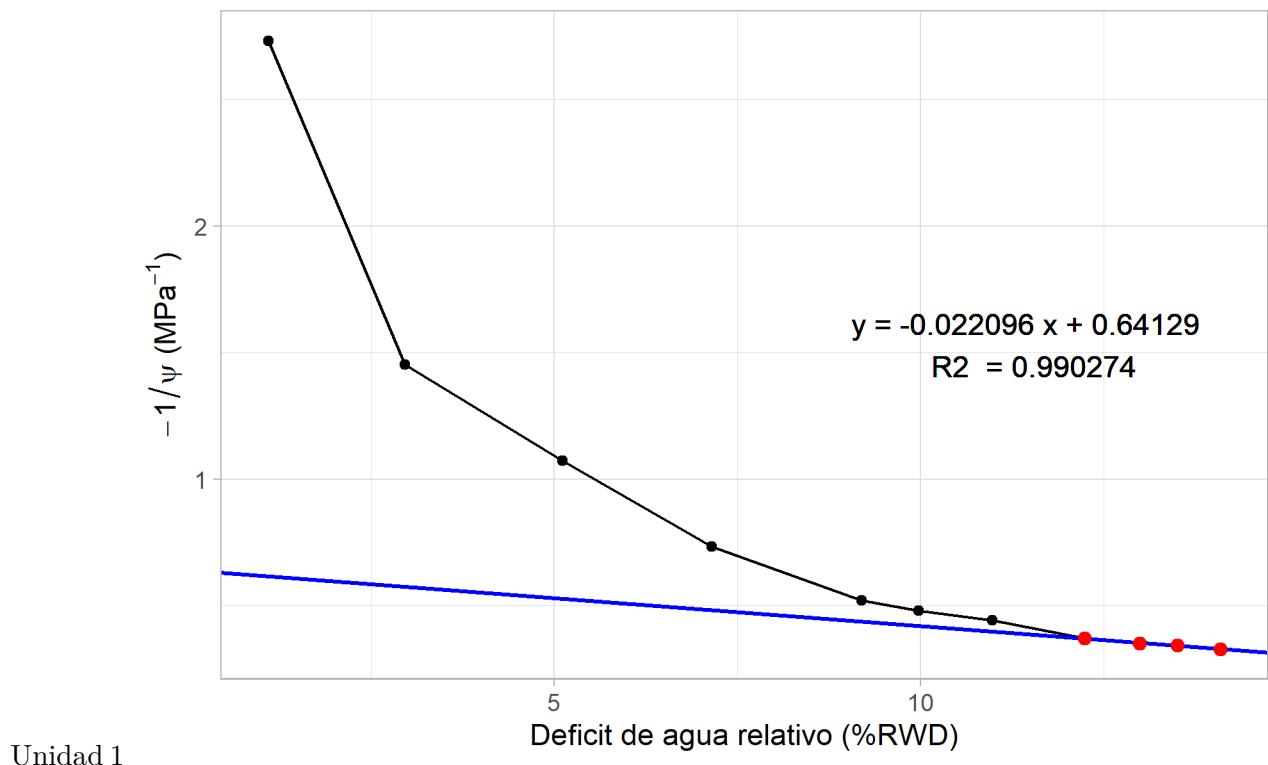


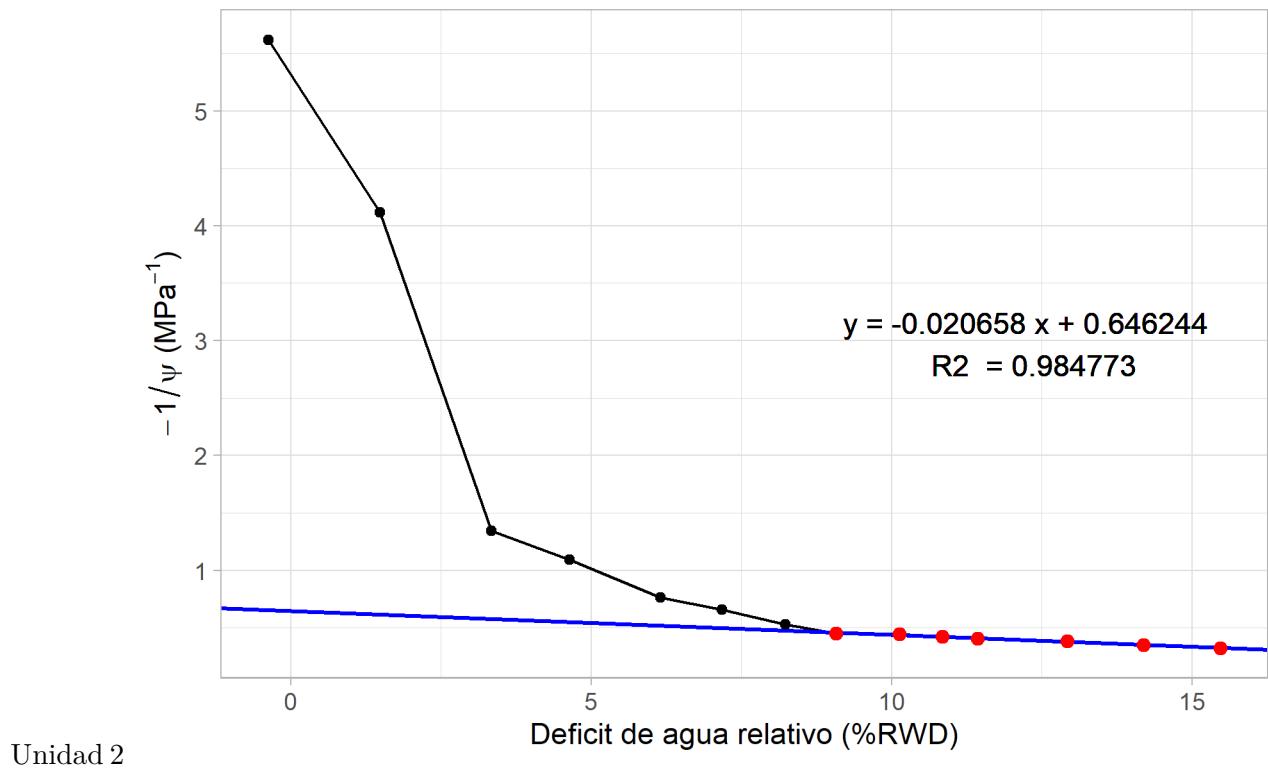
Figura 40.1: Ejemplo de una curva presión-volumen. Los círculos llenos representan las primeras 5 mediciones iterativas: los círculos abiertos representan las últimas 6 mediciones. La porción lineal (línea sólida) muestra el potencial osmótico (Ψ_o), la porción curva (línea discontinua) es el potencial hídrico antes del punto de pérdida de turgencia (TLP), y el área sombreada es el potencial de turgencia (Ψ_p). Fuente: Halbritter et al. (2020).

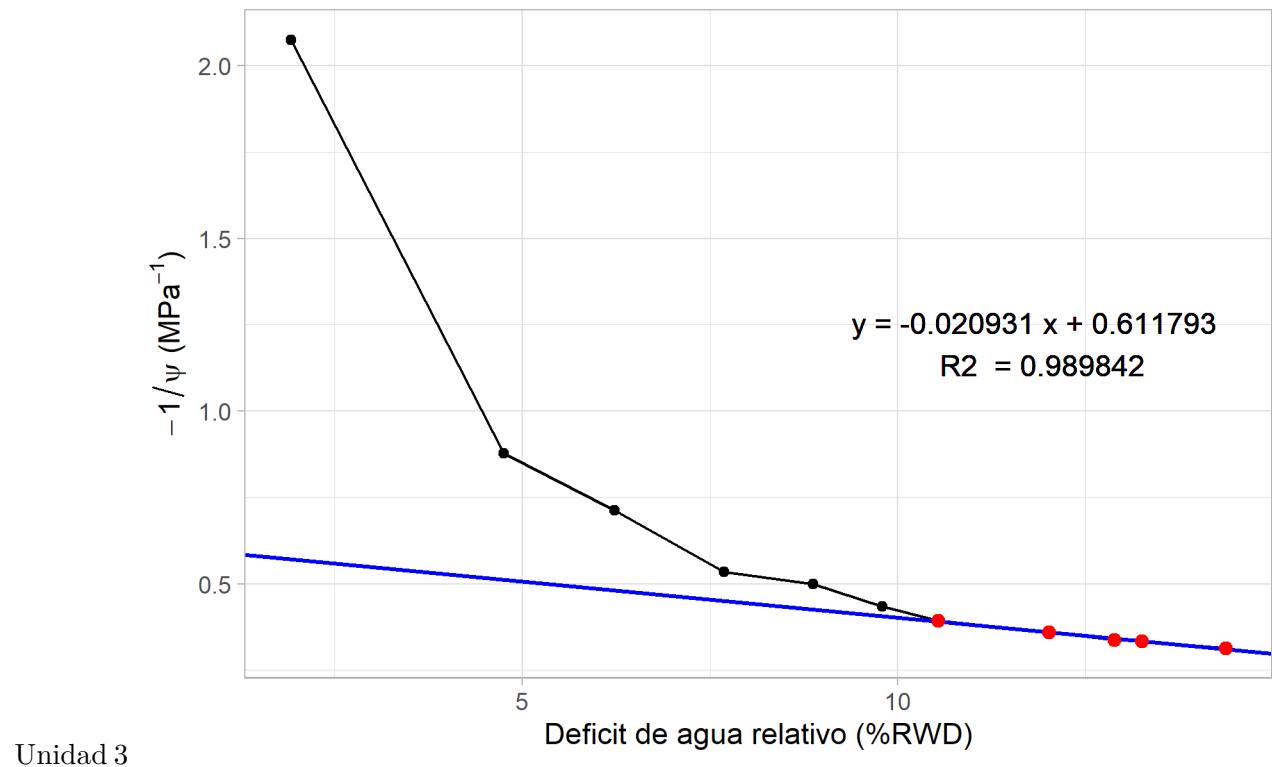
En base a esta misma metodología, a continuación se presentan las curvas presión-volumen de cada unidad medida.

40.1 La Esperanza

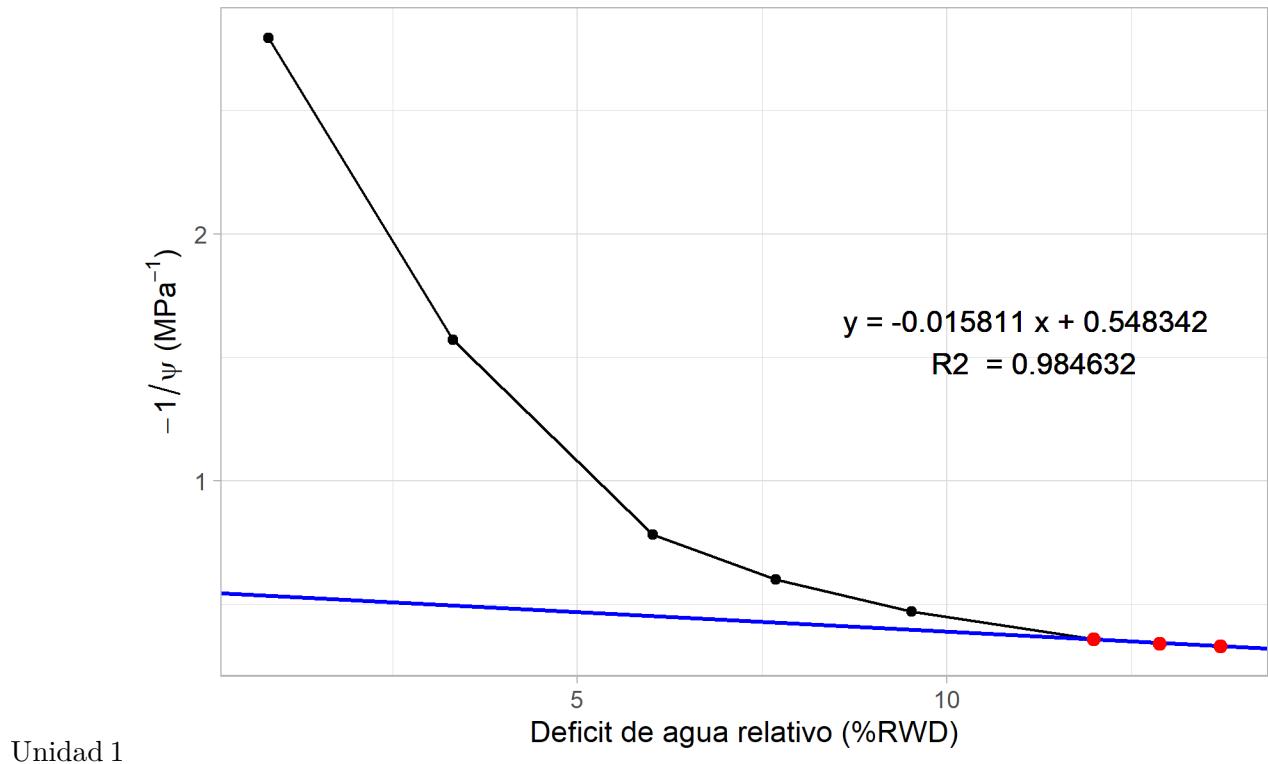
41 Tratamiento 0 (control)

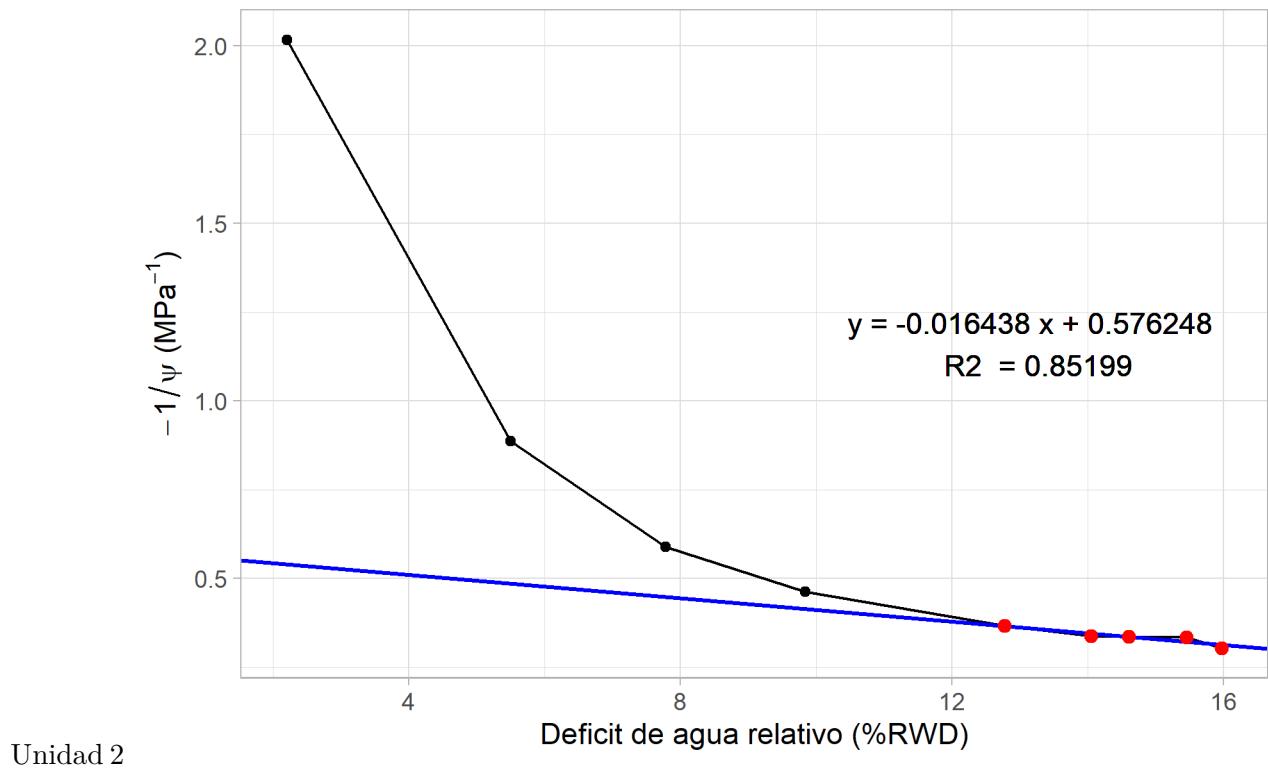


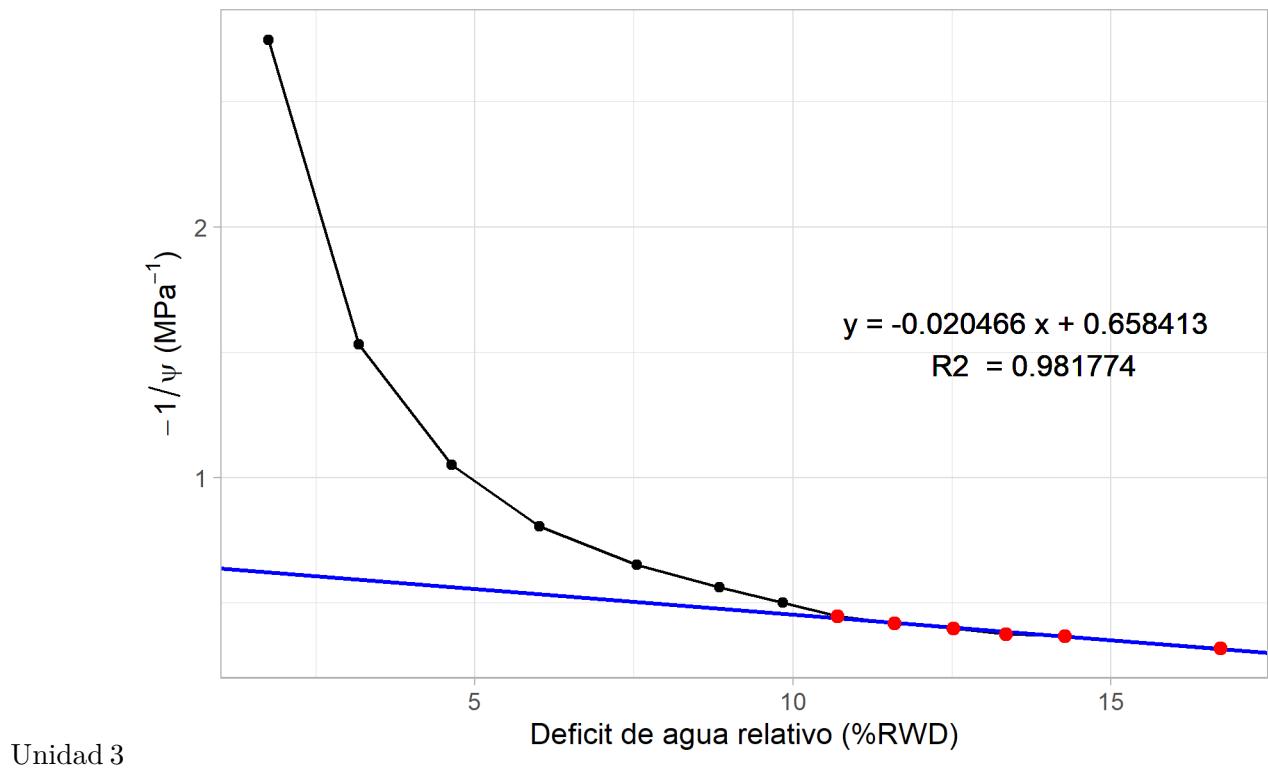




42 Tratamiento 4



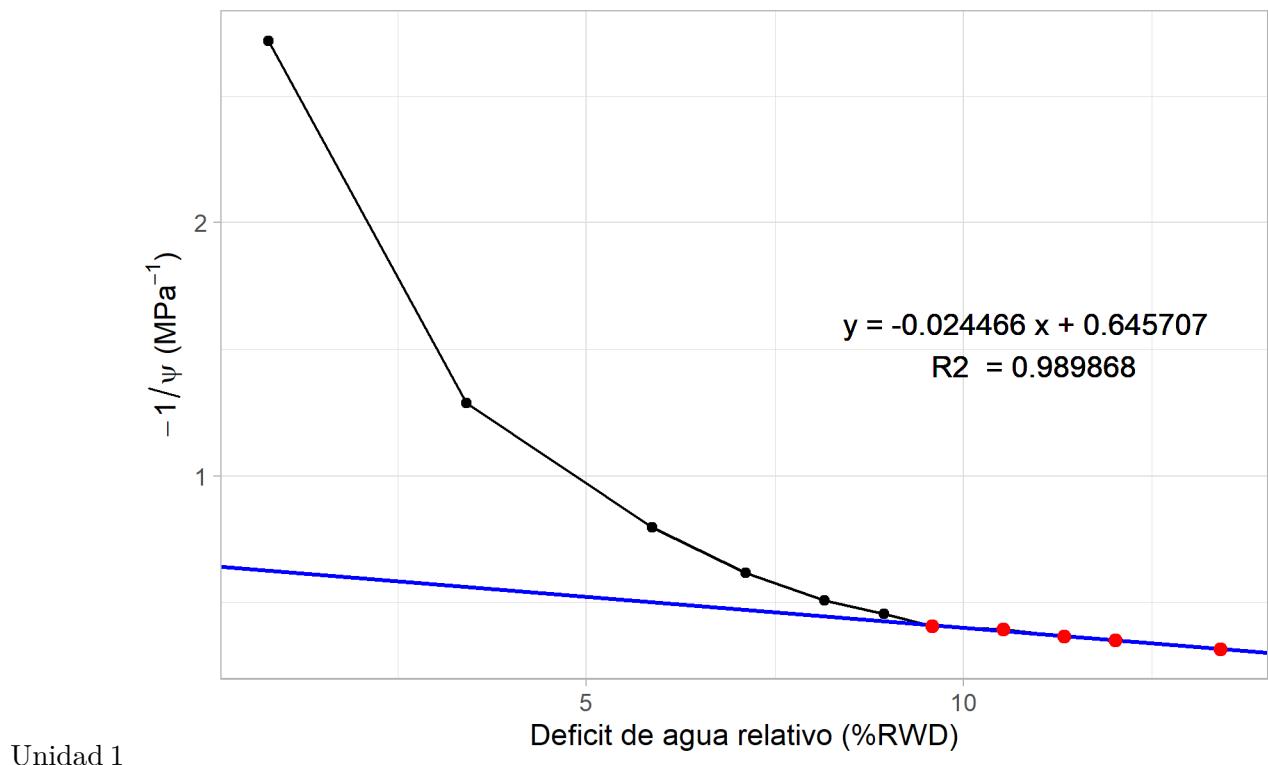


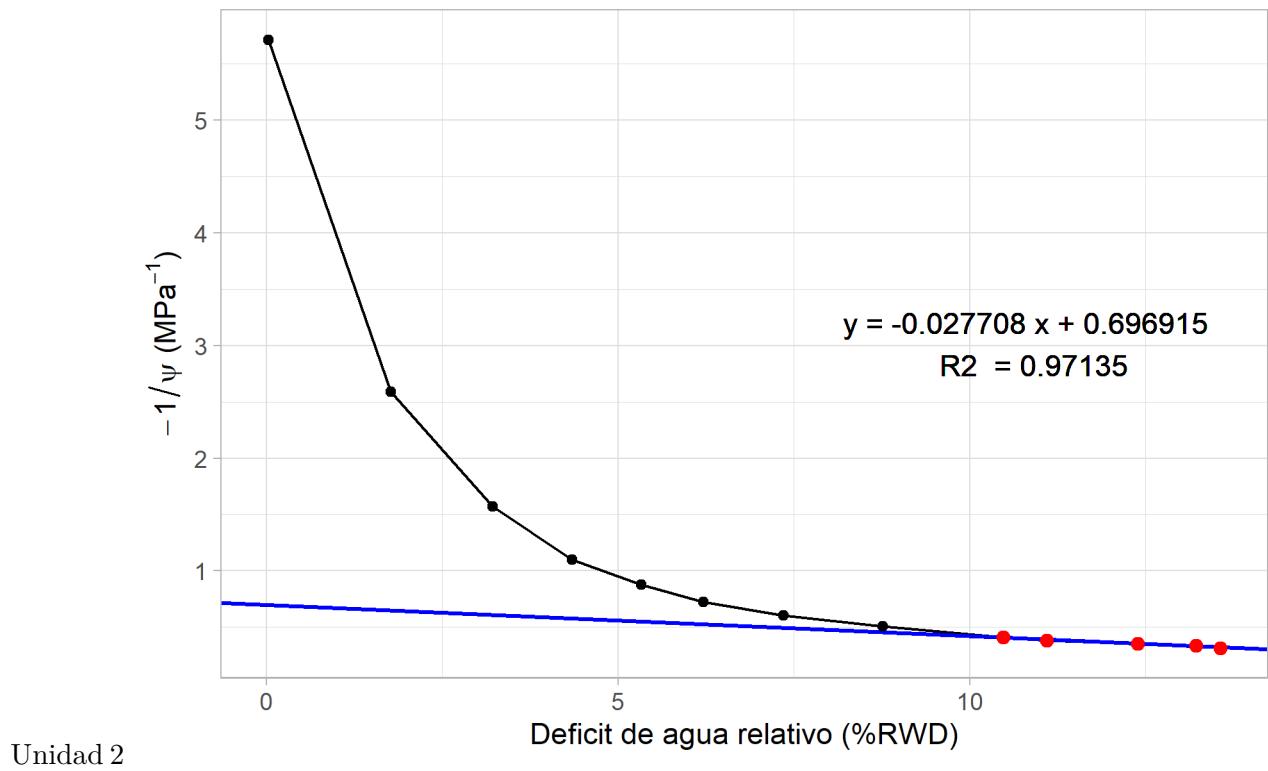


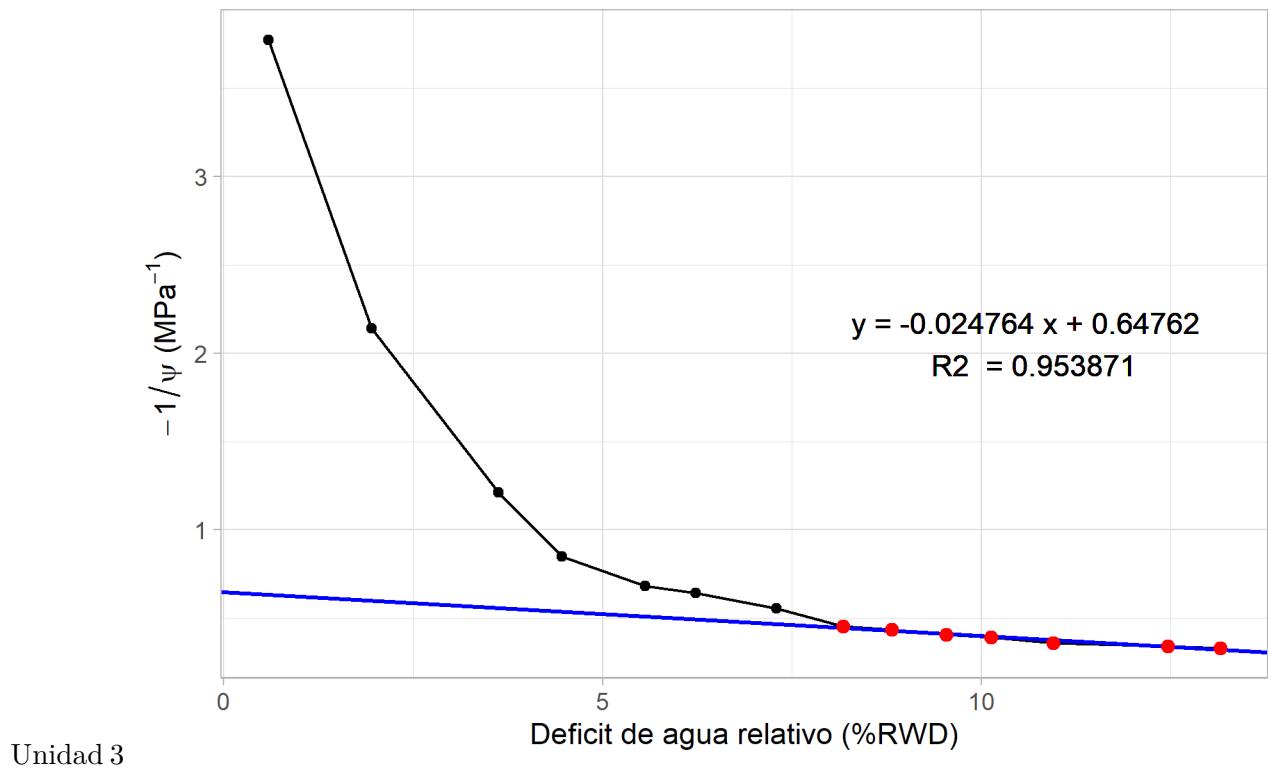
Unidad 3

42.1 Rio Claro

43 Tratamiento 0 (control)

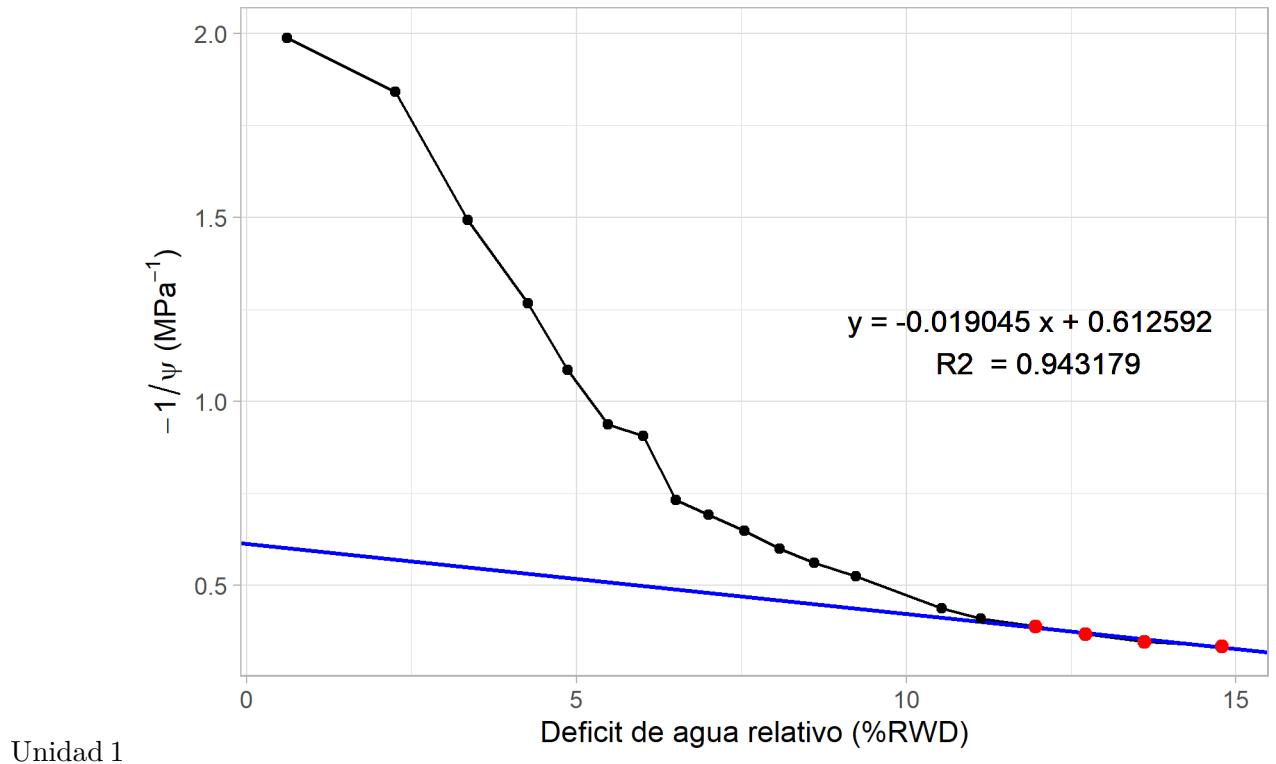


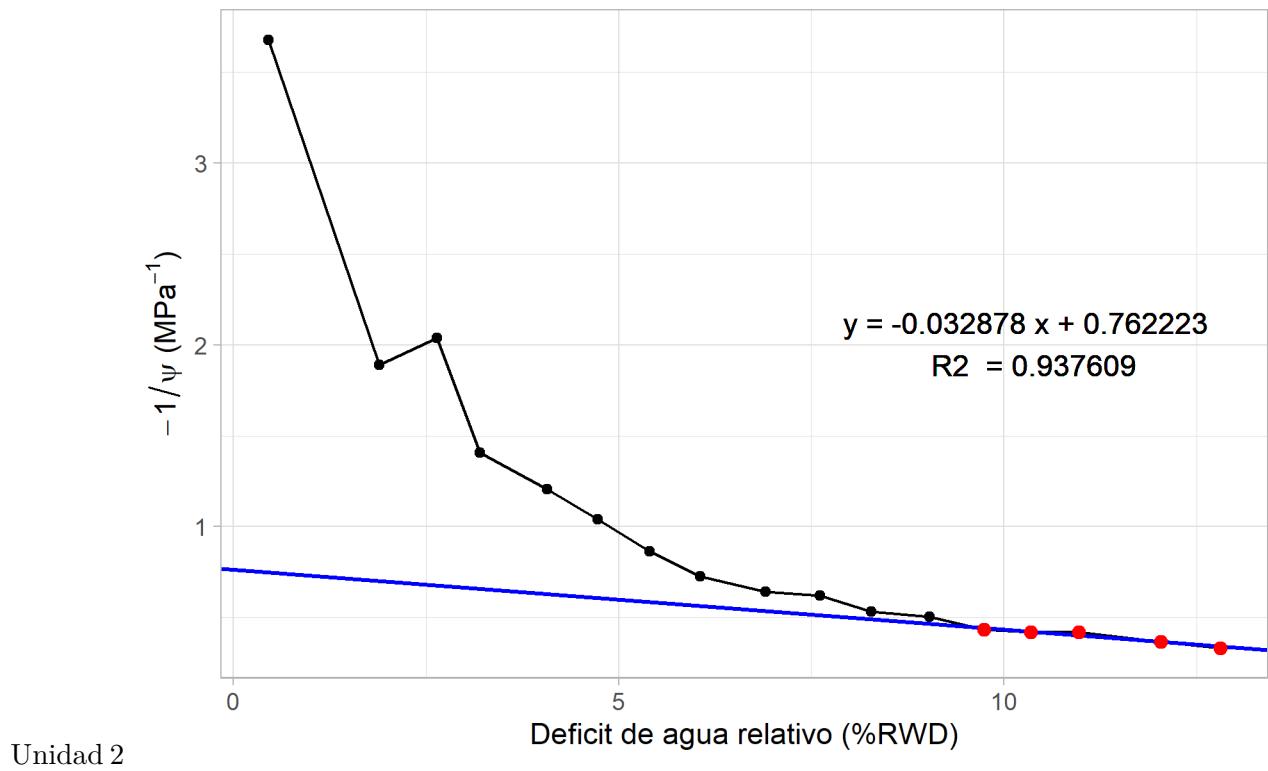


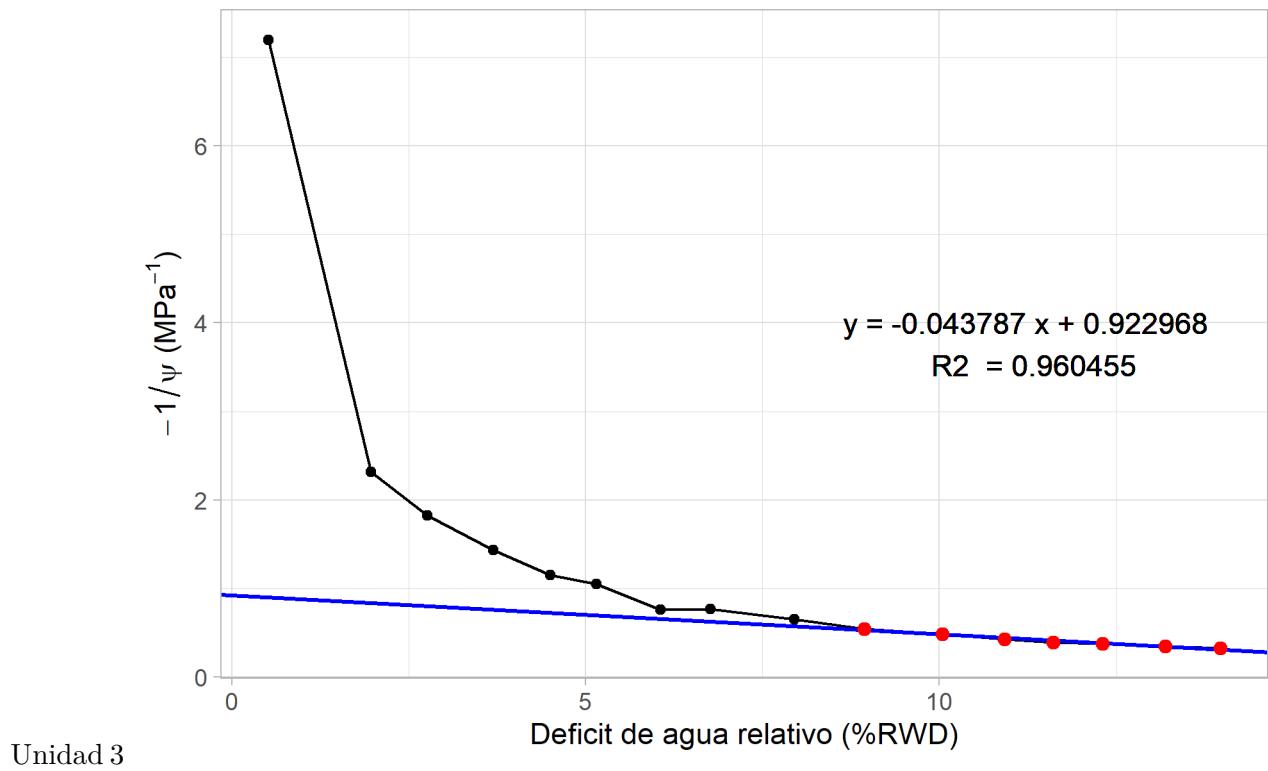


Unidad 3

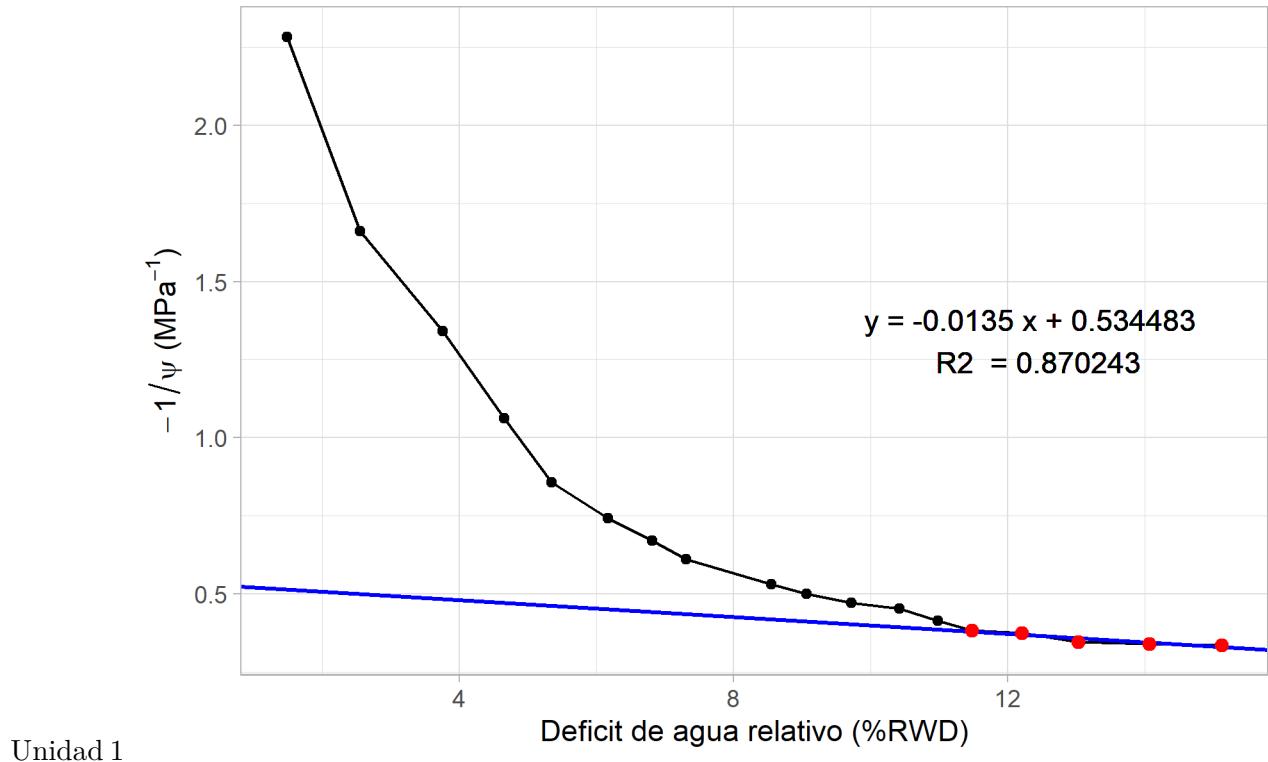
44 Tratamiento 1

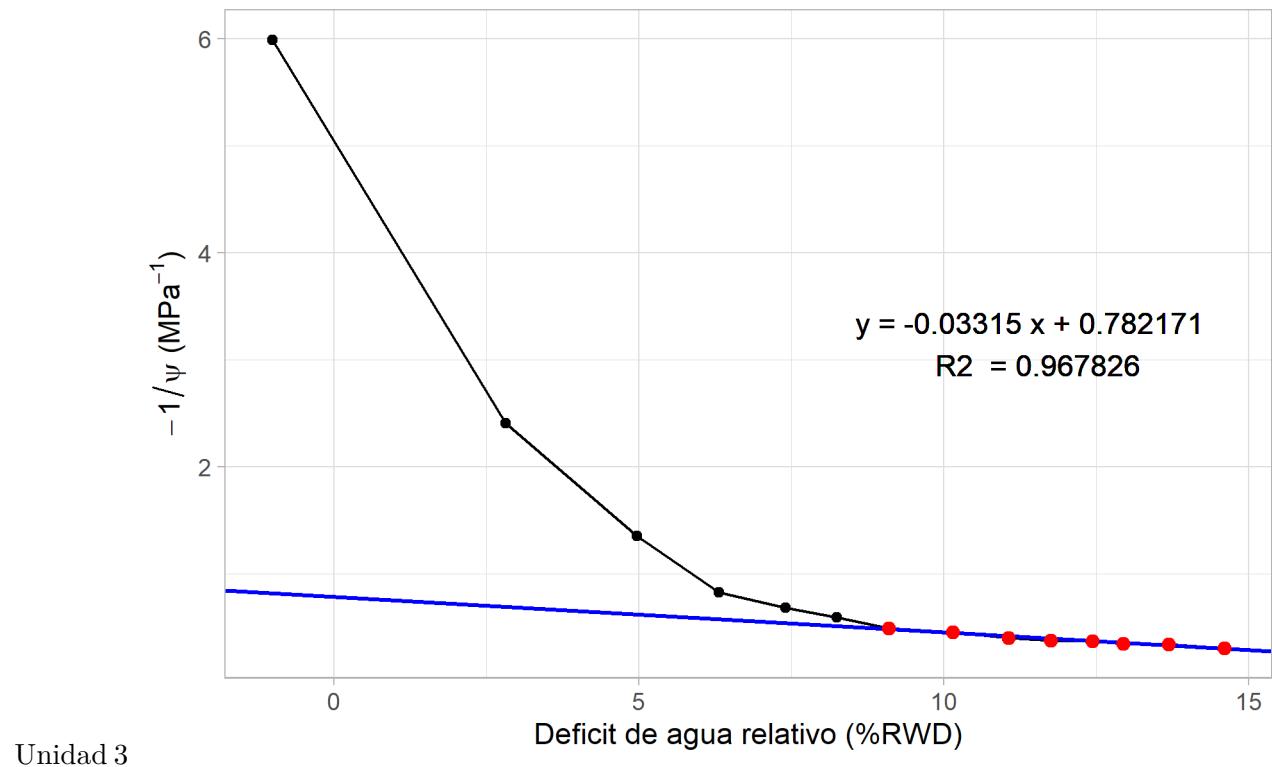




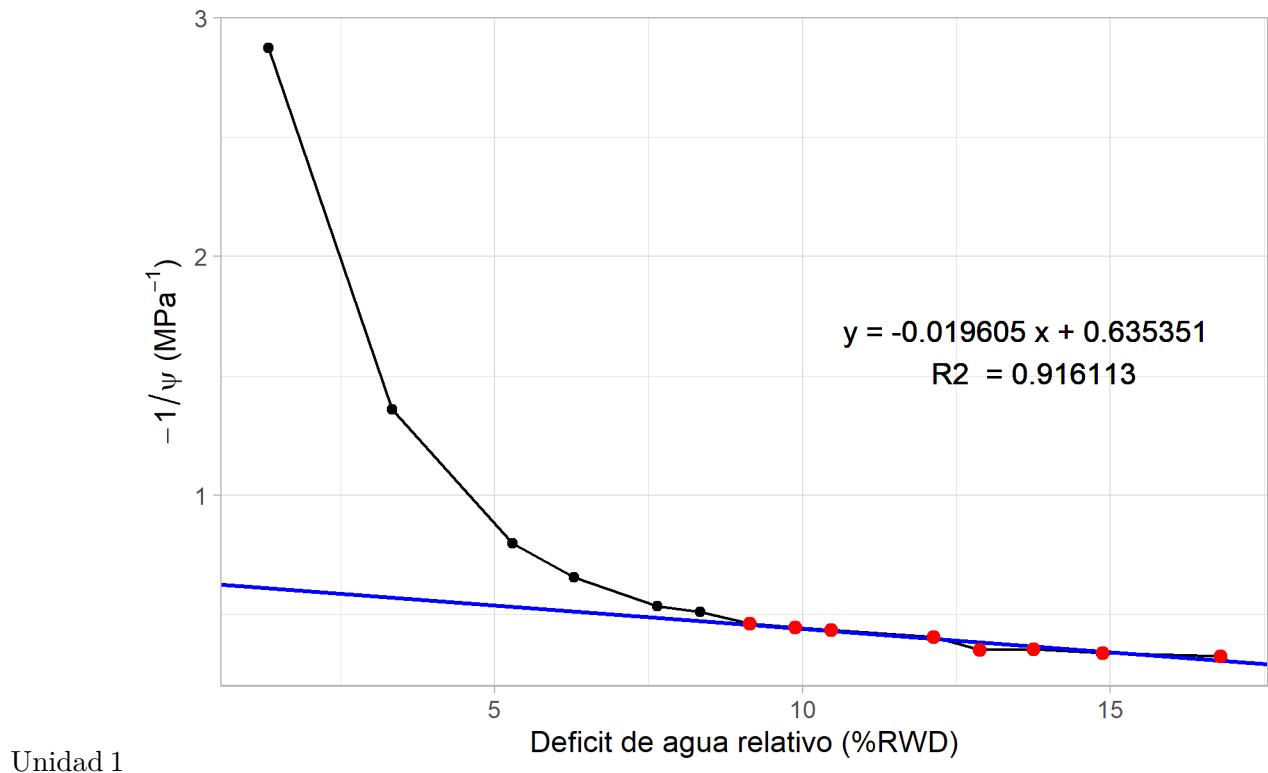


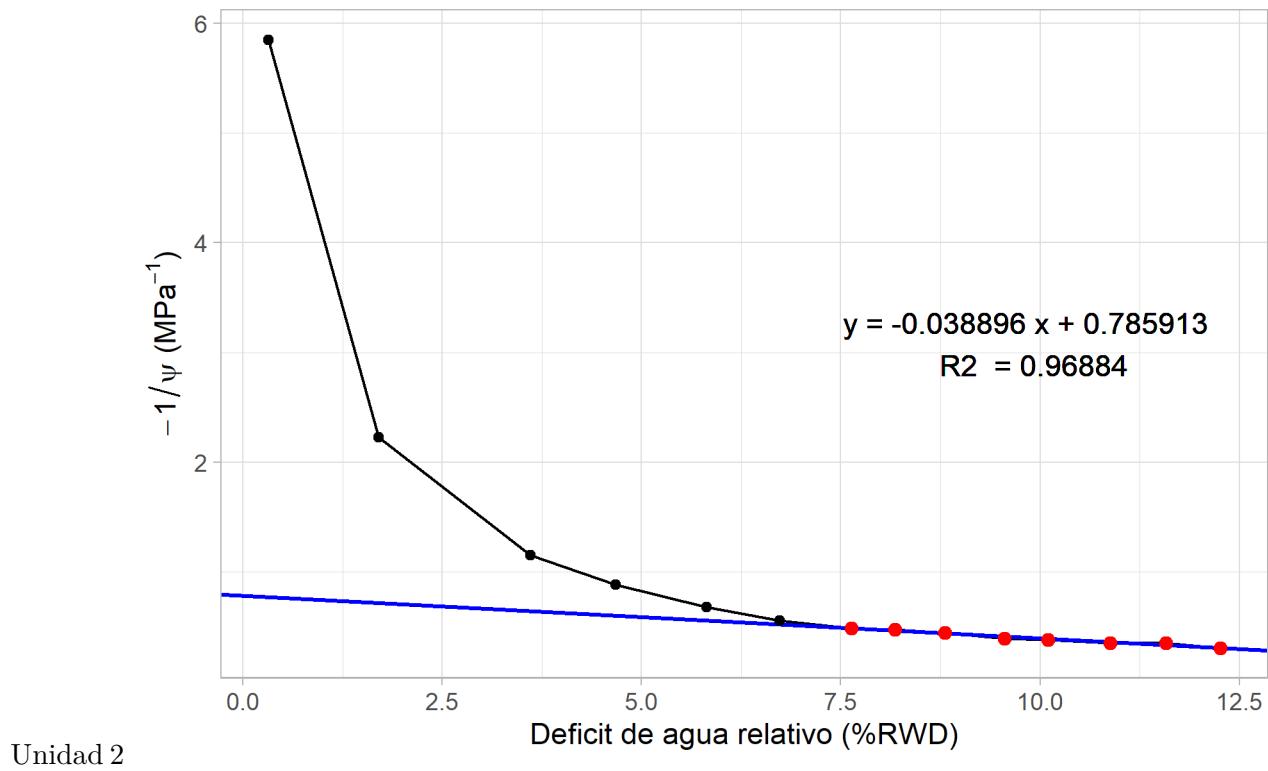
45 Tratamiento 2

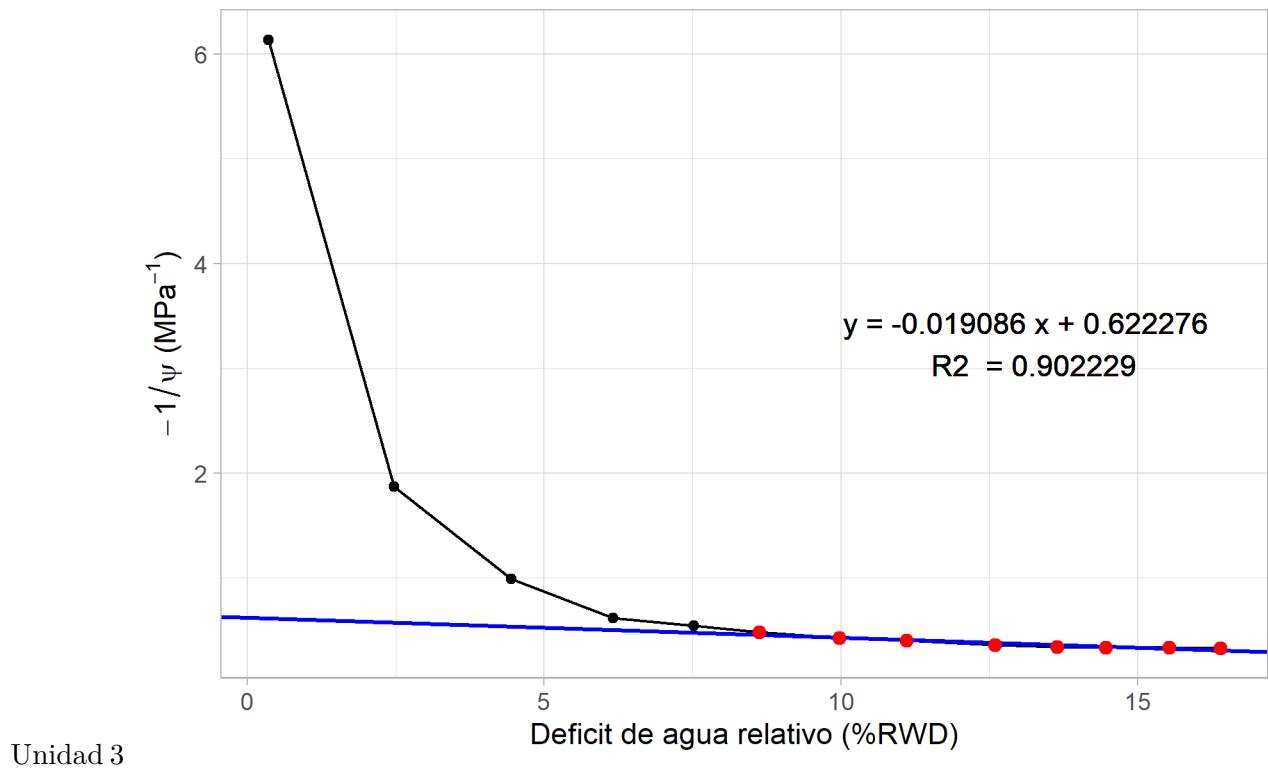




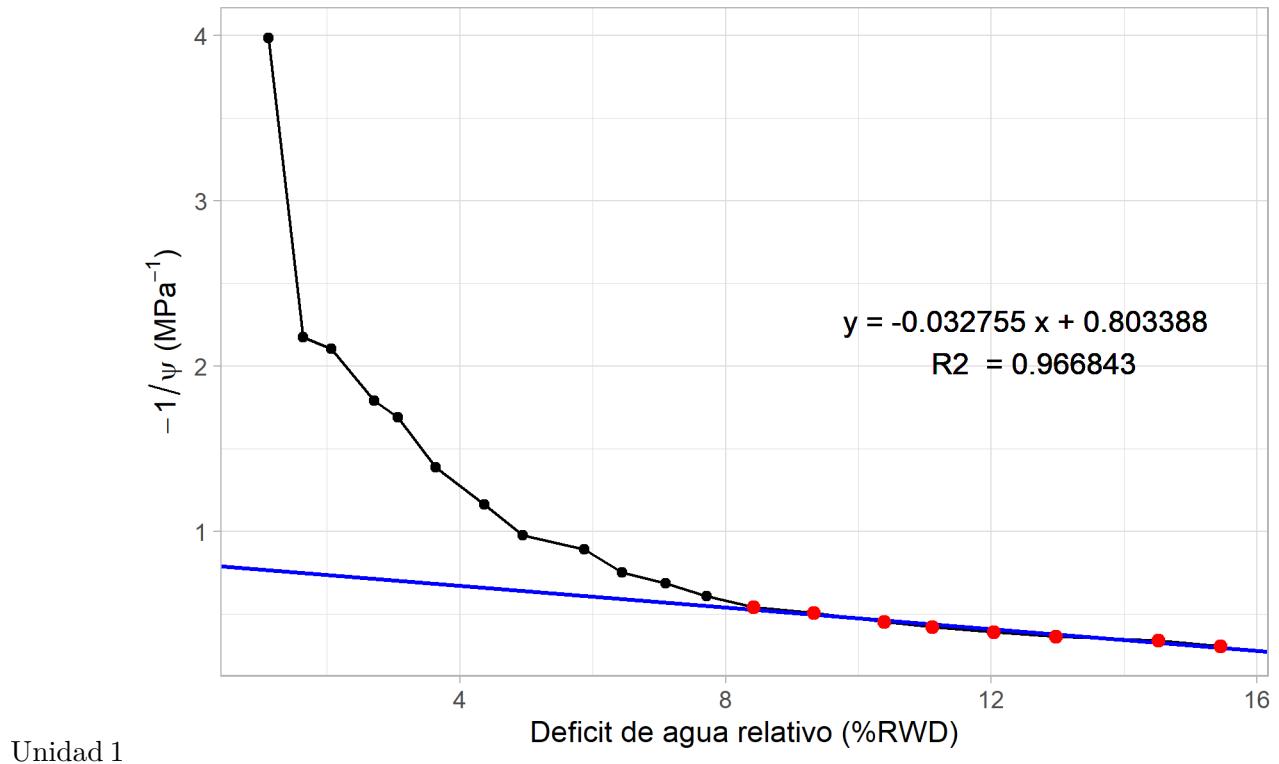
46 Tratamiento 3

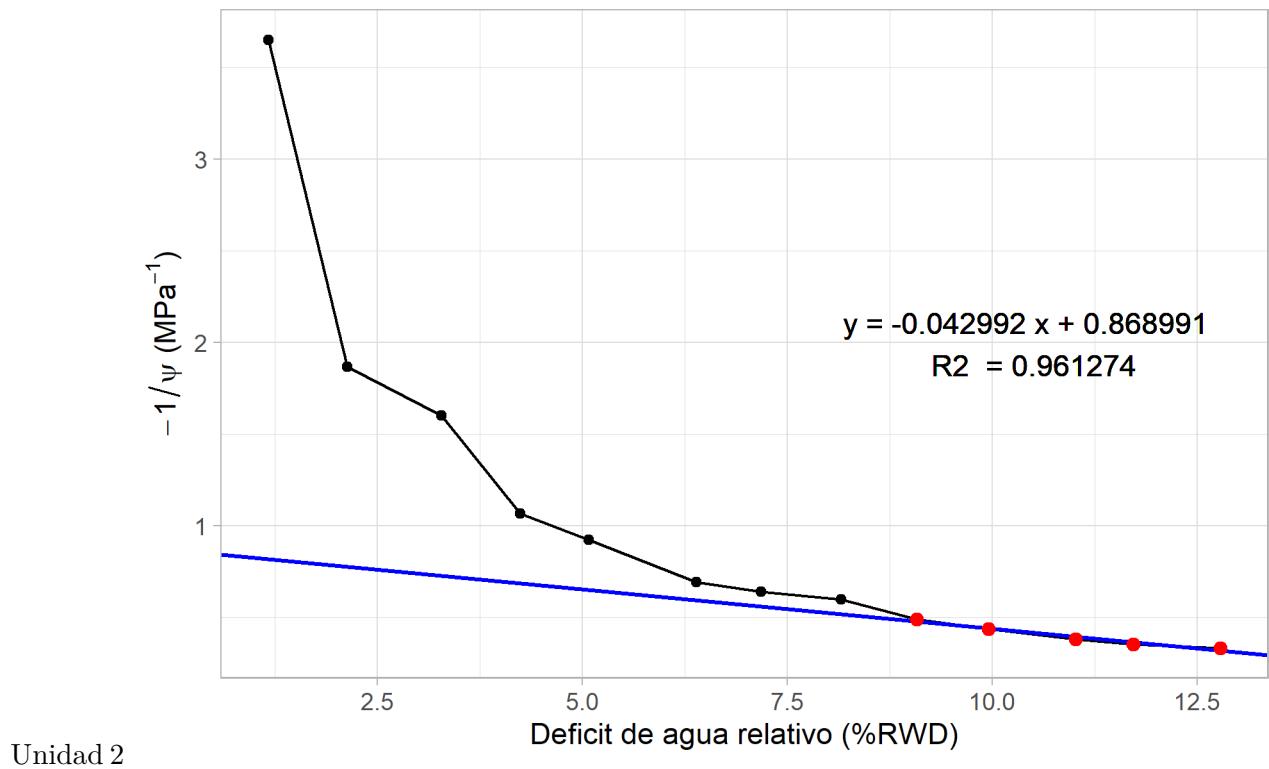


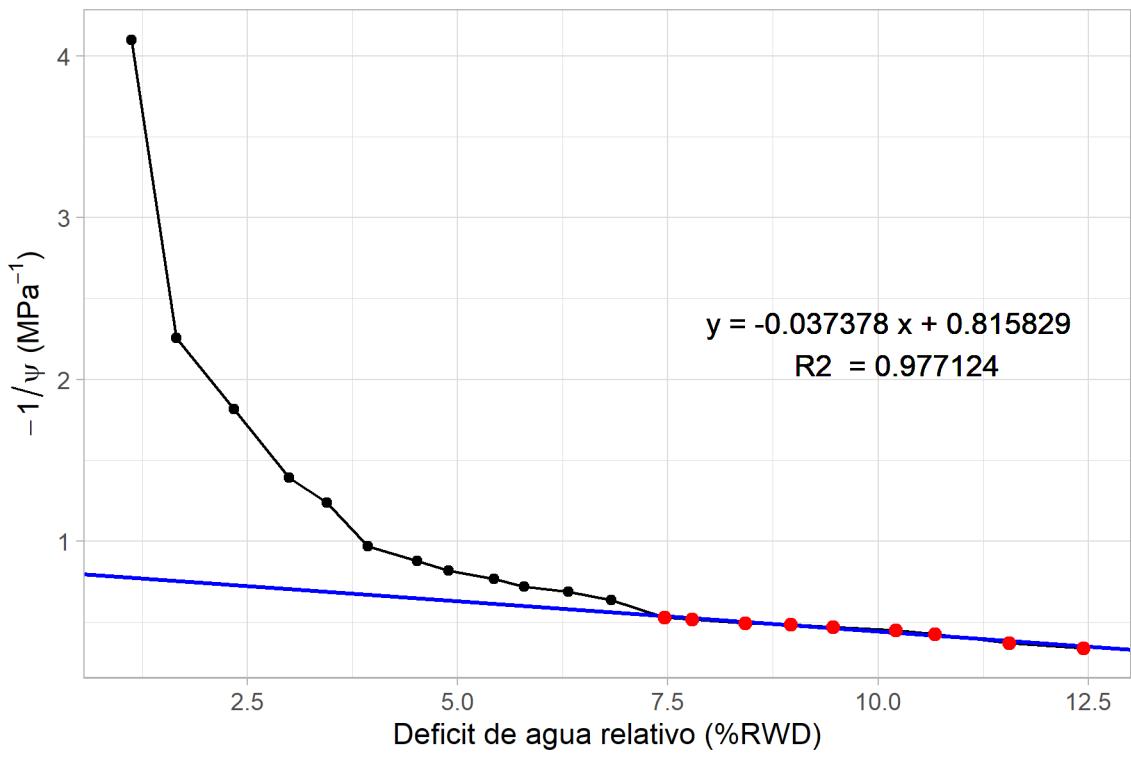




47 Tratamiento 4







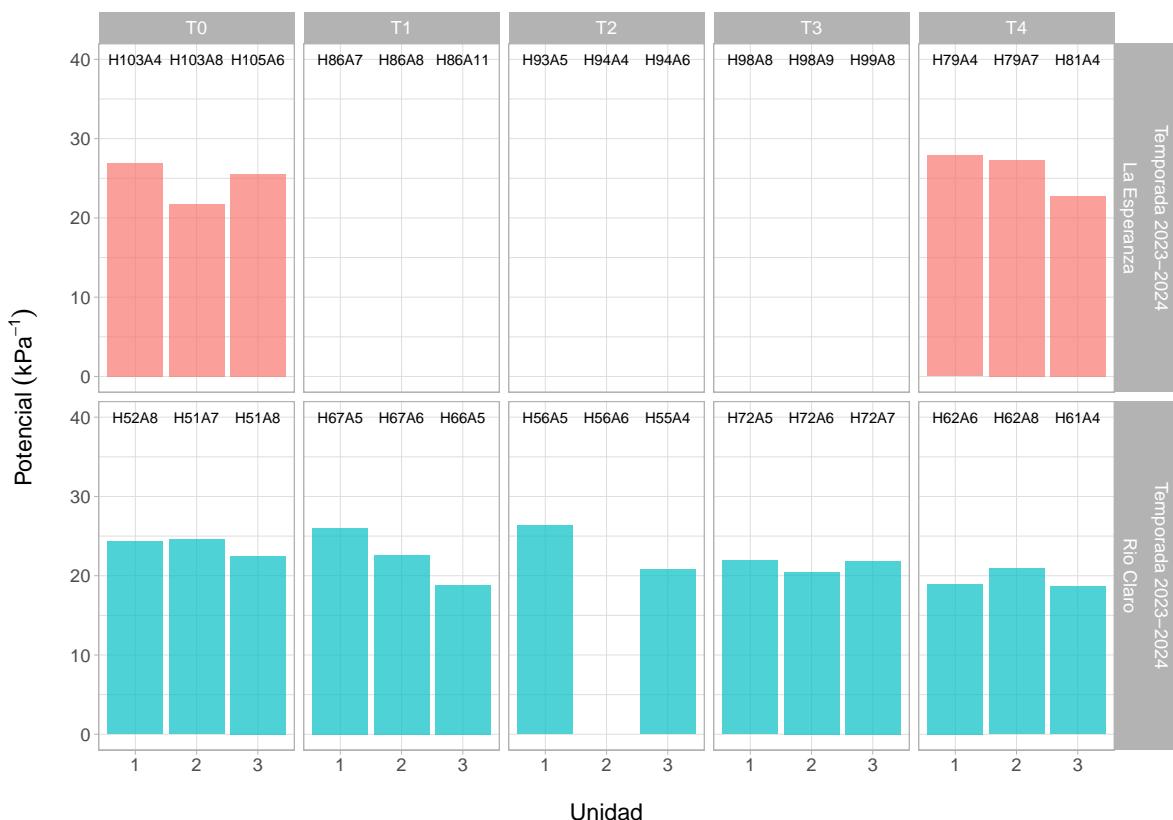
Unidad 3

48 Referencias

Halbritter, A. H., Eycott, A., Reinsch, S., & De Boeck, H. (2020). The handbook for standardised field and laboratory measurements in terrestrial climate-change experiments and observational studies (ClimEx). *Methods in Ecology and Evolution*, 11(1), 22–37.

49 Punto de pérdida de turgor

A continuación se presentan los puntos de pérdida de turgor de cada unidad, según tratamiento, sitio y temporada, a partir de las curvas presión-volumen.

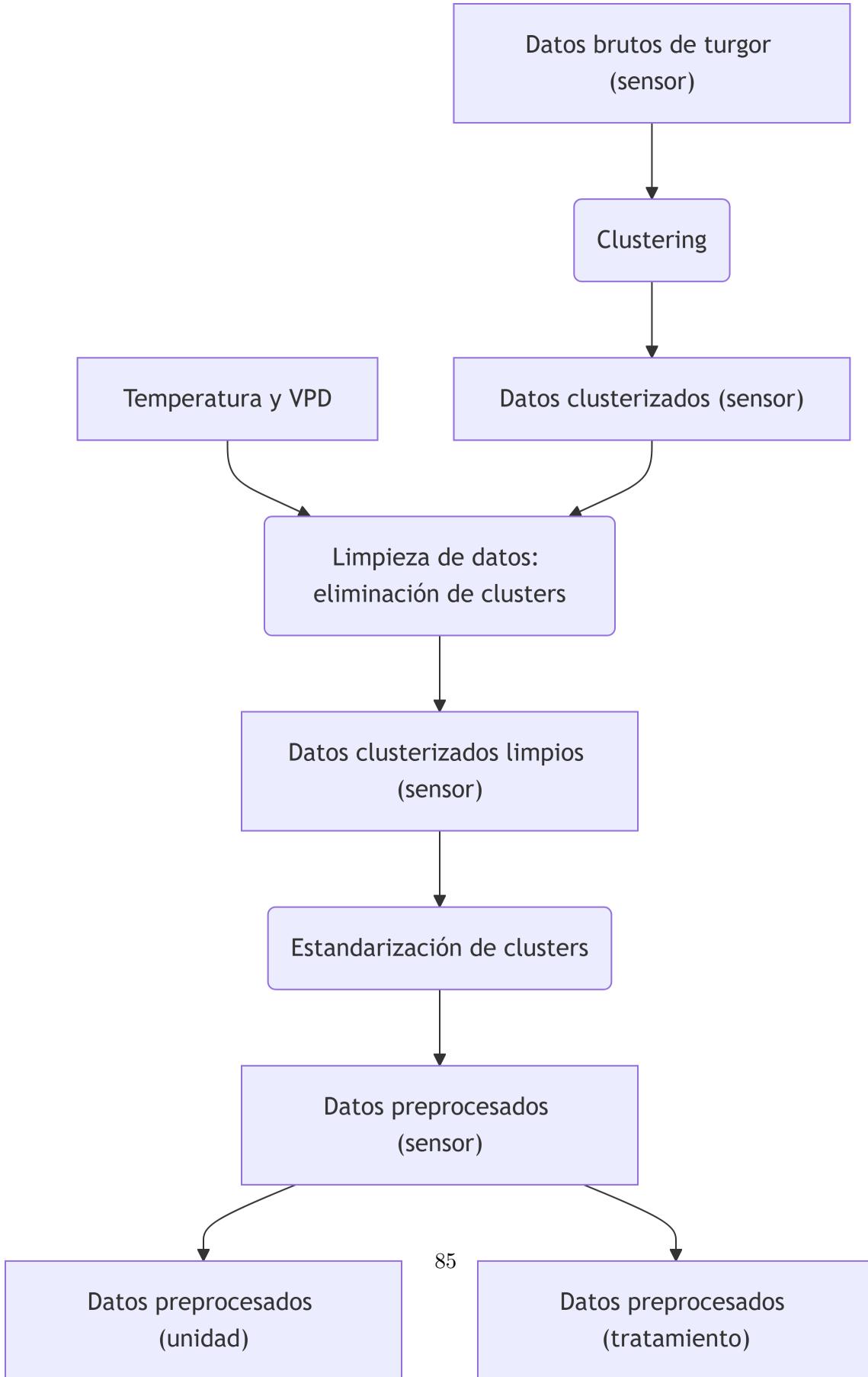


Parte V

Preprocesamiento de datos de turgor

El preprocessamiento de los datos de turgor consistió en tres etapas principales: filtrado, clustering y modelado. Primero, se eliminaron registros inconsistentes mediante tres criterios: (i) estabilidad en la serie de turgor (diferencias estandarizadas < 1), (ii) correlaciones esperadas con temperatura y VPD (positiva y negativa, respectivamente) y (iii) una correlación mínima de 0.5 con al menos una de estas variables. Posteriormente, se excluyeron valores fuera del rango temporal relevante.

Luego, se agruparon los datos por sitio, temporada y sensor, calculando estadísticos diarios (mediana, máximo y mínimo) y aplicando clustering con DBSCAN para identificar patrones coherentes. Finalmente, se ajustaron modelos lineales entre turgor y los primeros componentes principales (PC1 y PC2), obteniendo coeficientes de regresión para cada grupo. Con estos parámetros, se generó una serie modelada de turgor a partir de la información PCA y se escaló para comparación.



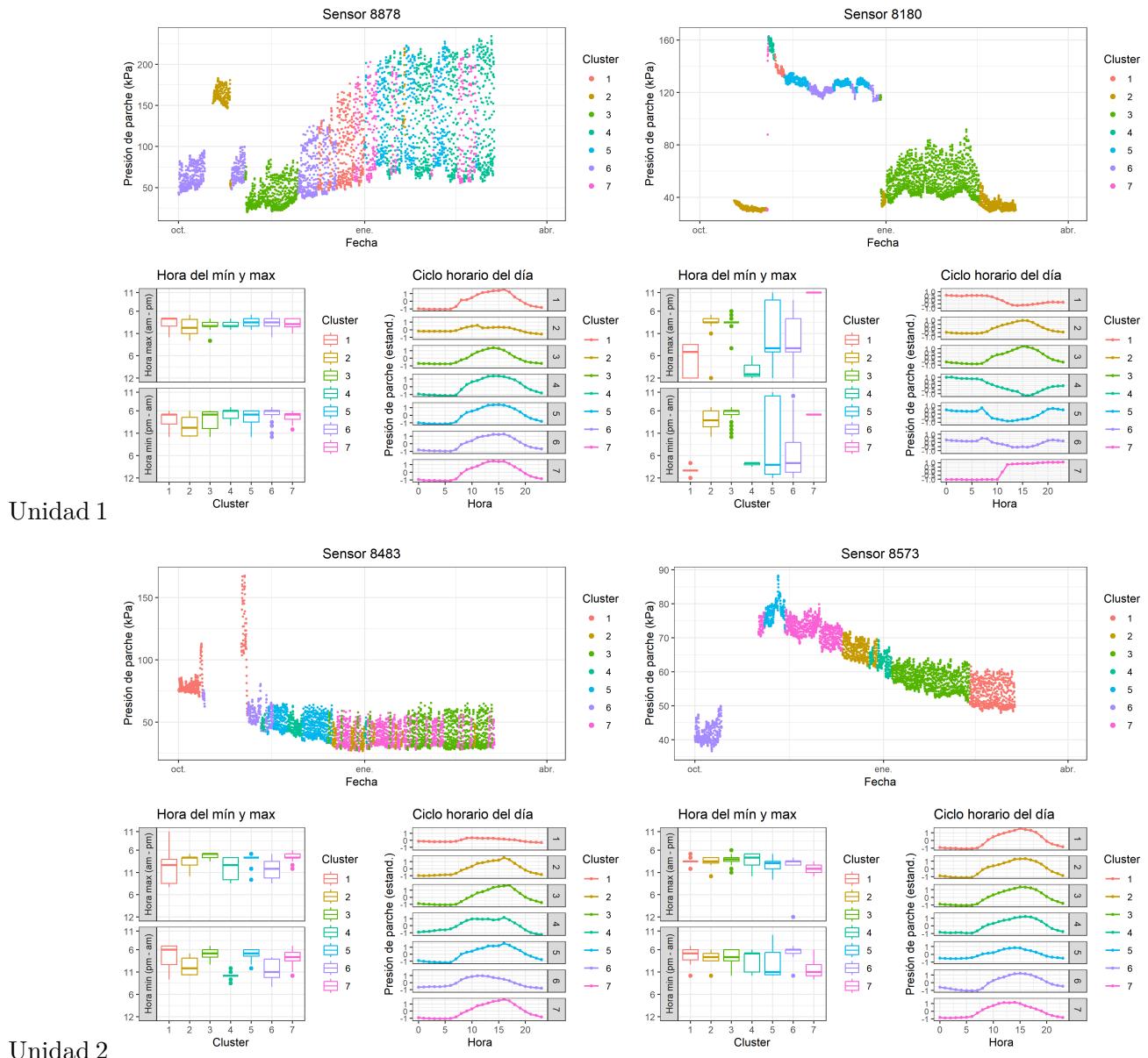
50 Clustering

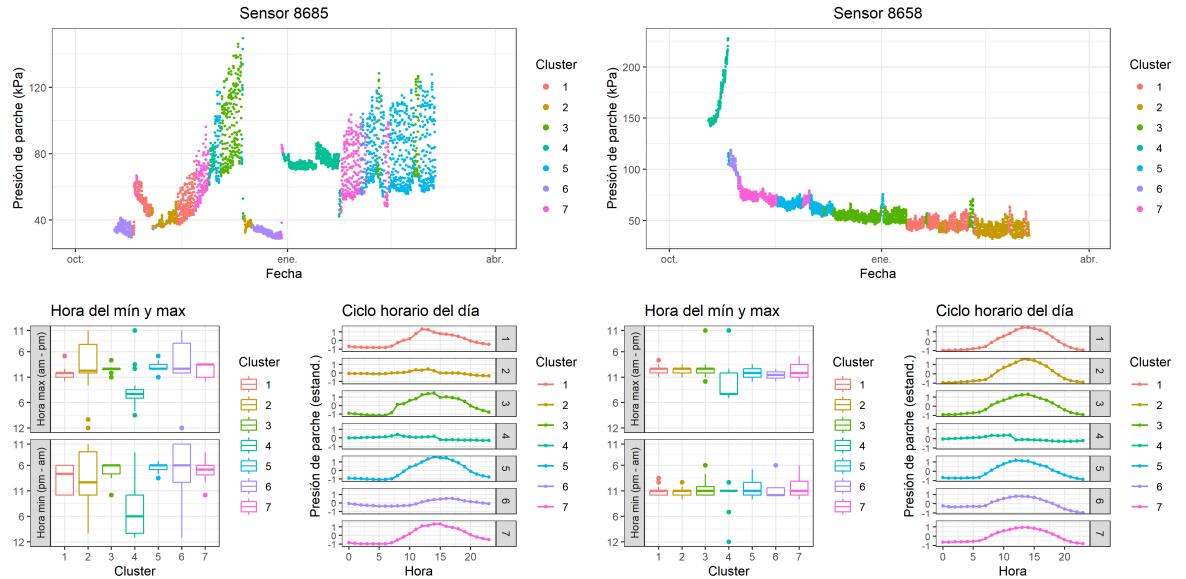
[Metodología de clustering].

A continuación, se muestran las series temporales de turgor diferenciadas por clúster, así como la distribución de las horas de turgor mínimo y máximo para cada uno de ellos, junto con su ciclo horario diario, abarcando todos los sensores en todas las unidades durante las temporadas 2022-2023 y 2023-2024.

50.1 La Esperanza

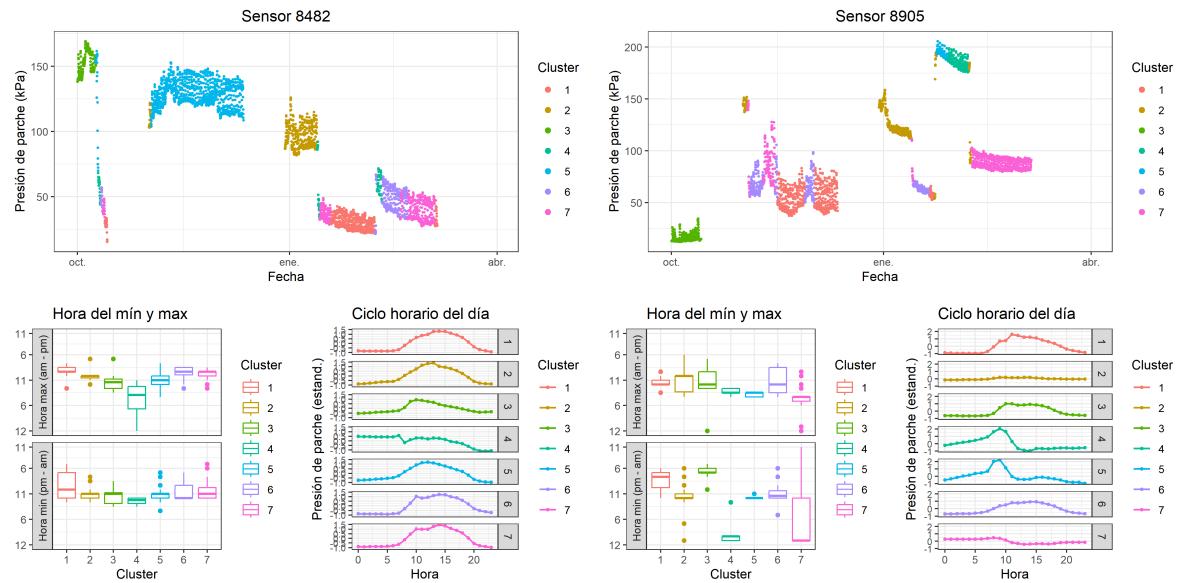
51 T1 (2022-2023)



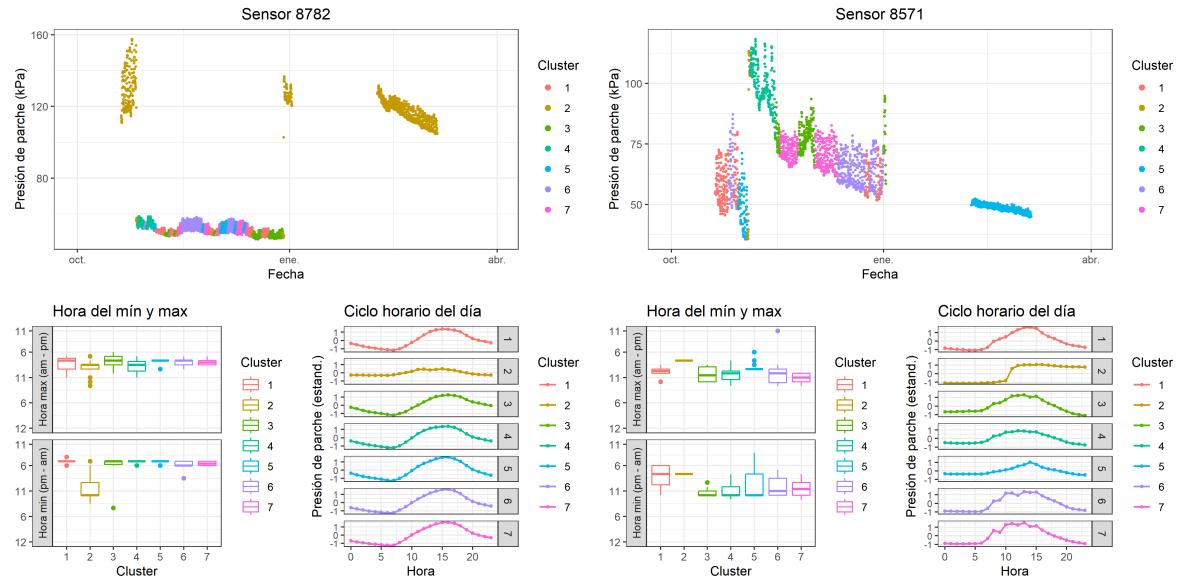


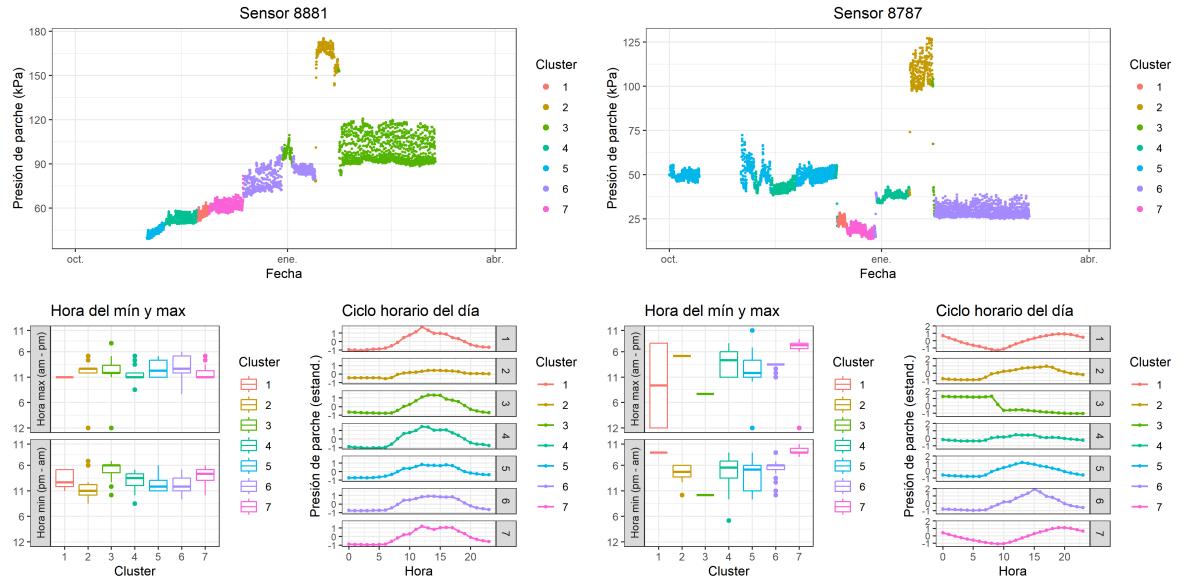
Unidad 3

52 T2 (2022-2023)



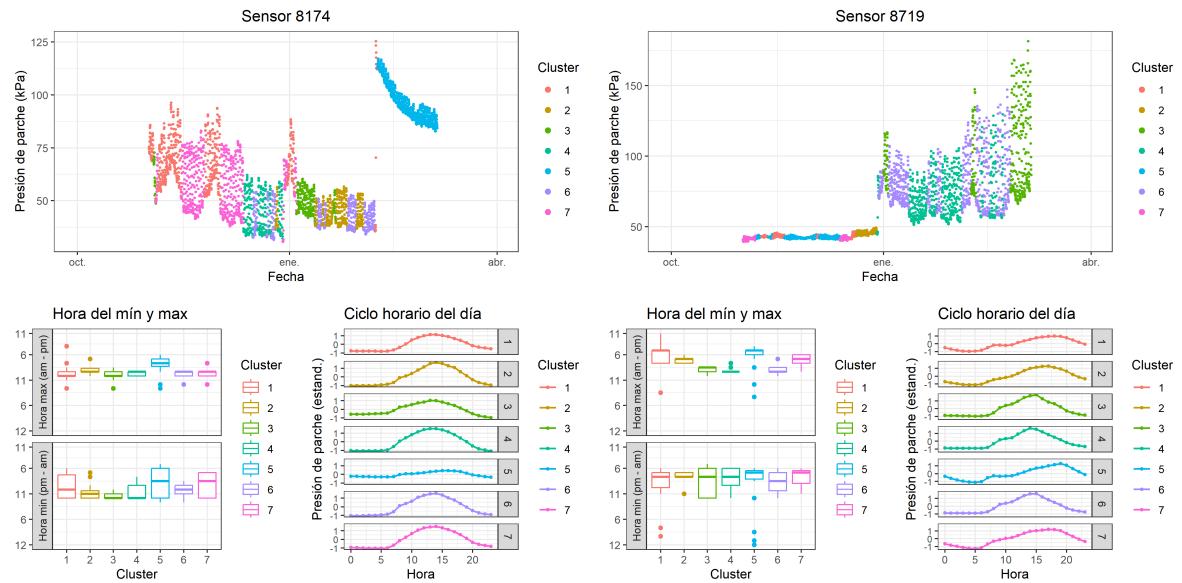
Unidad 1



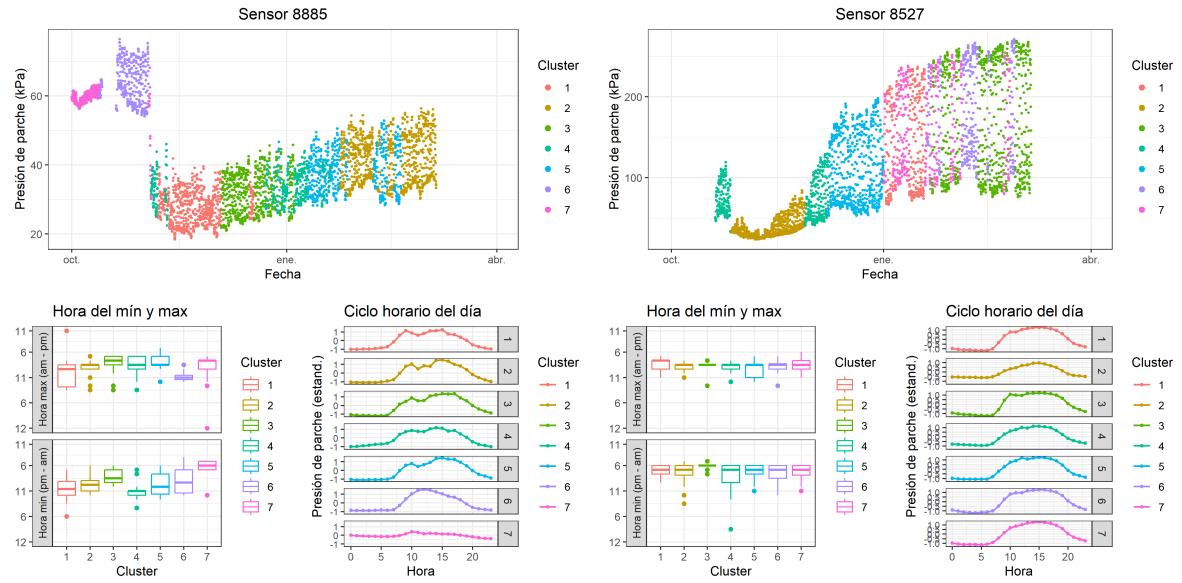


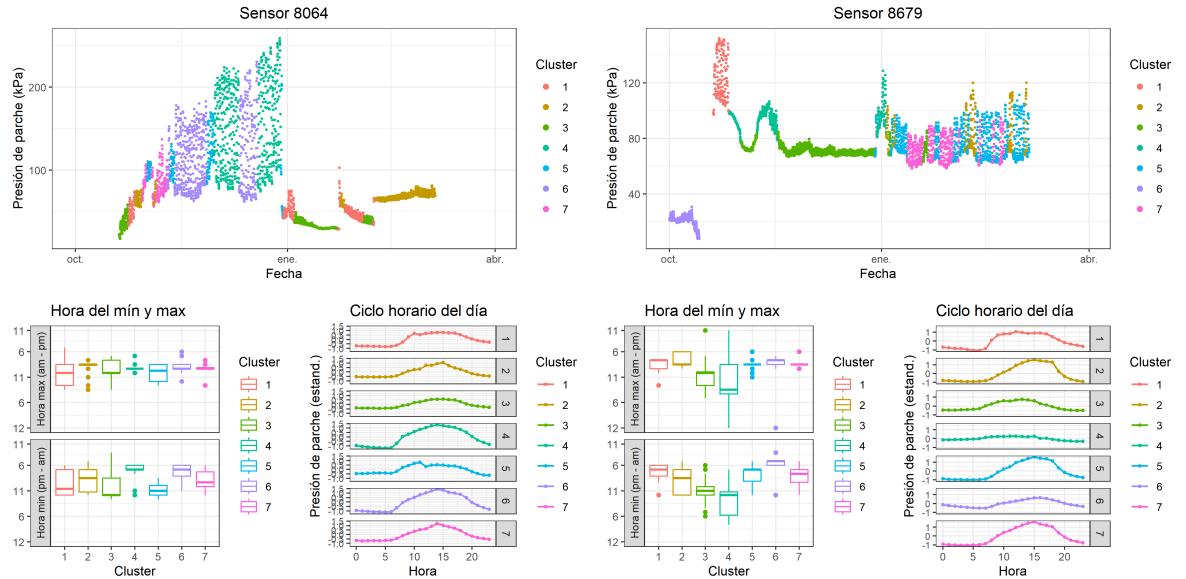
Unidad 3

53 T3 (2022-2023)



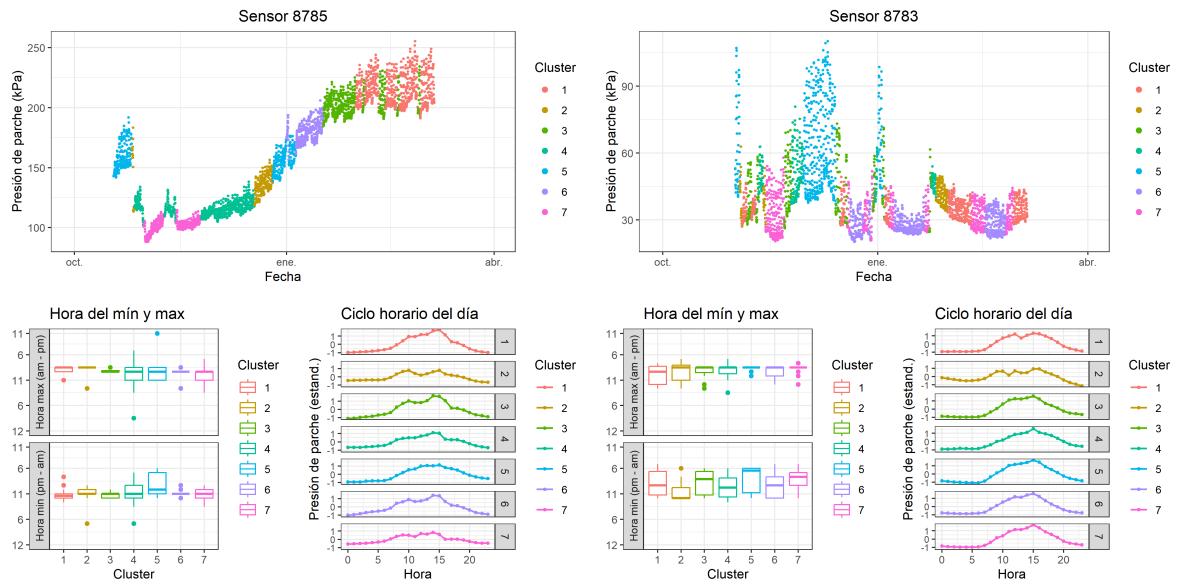
Unidad 1



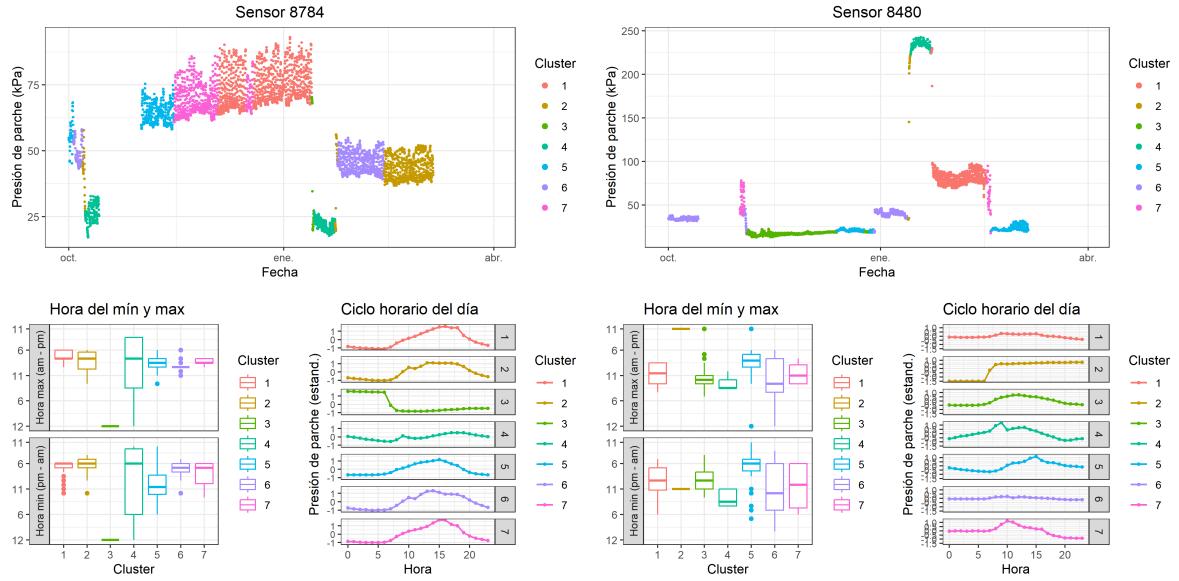


Unidad 3

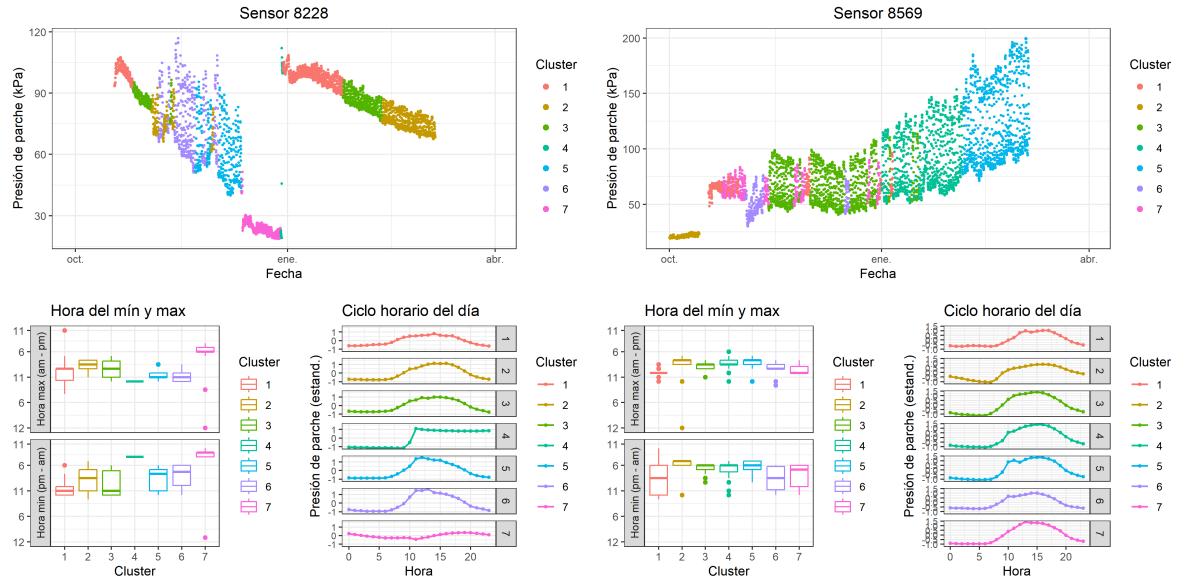
54 T4 (2022-2023)



Unidad 1

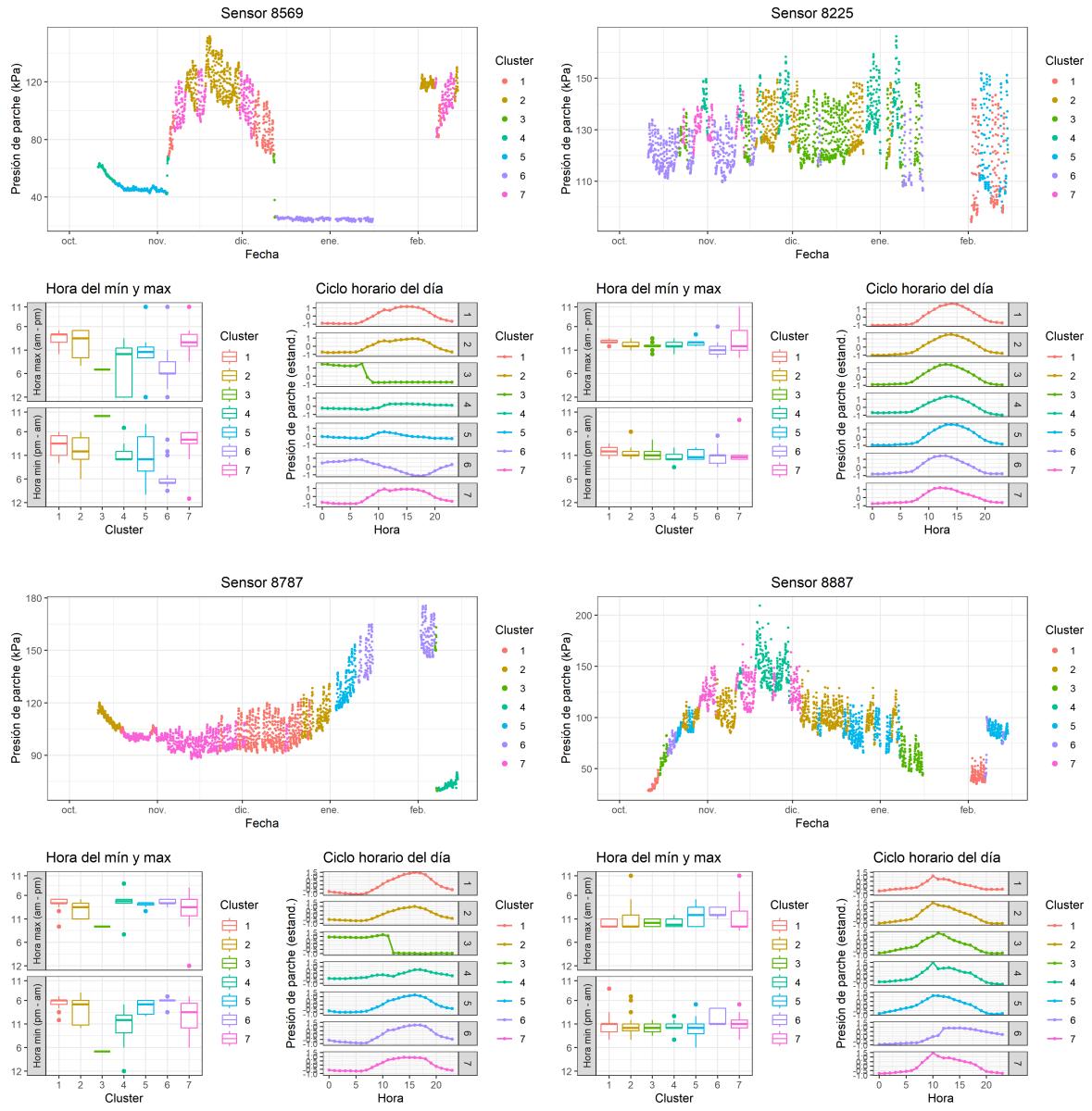


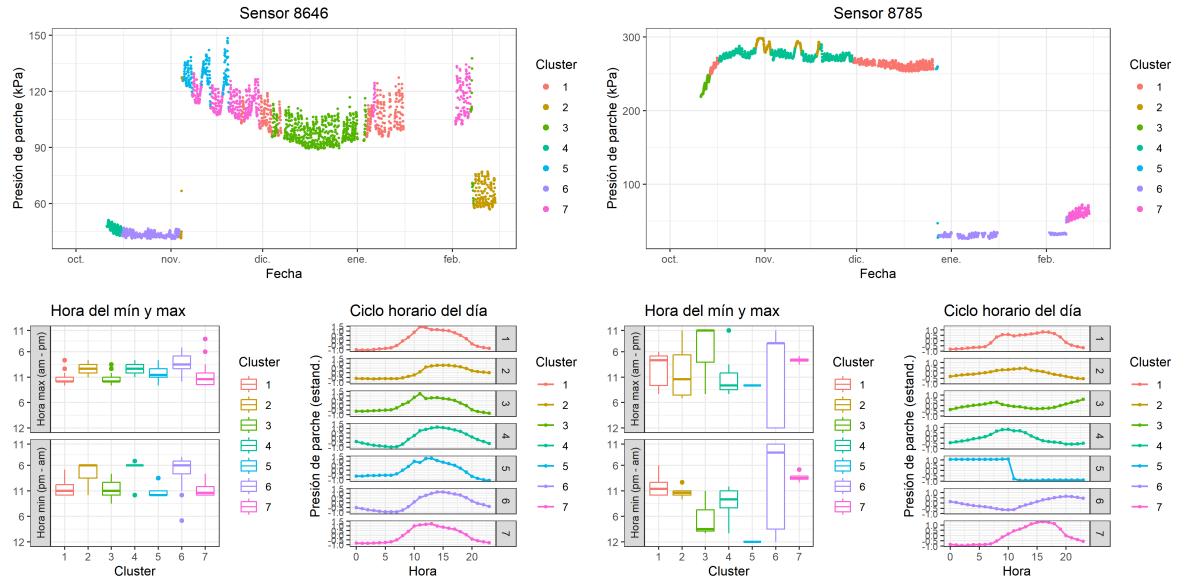
Unidad 2



Unidad 3

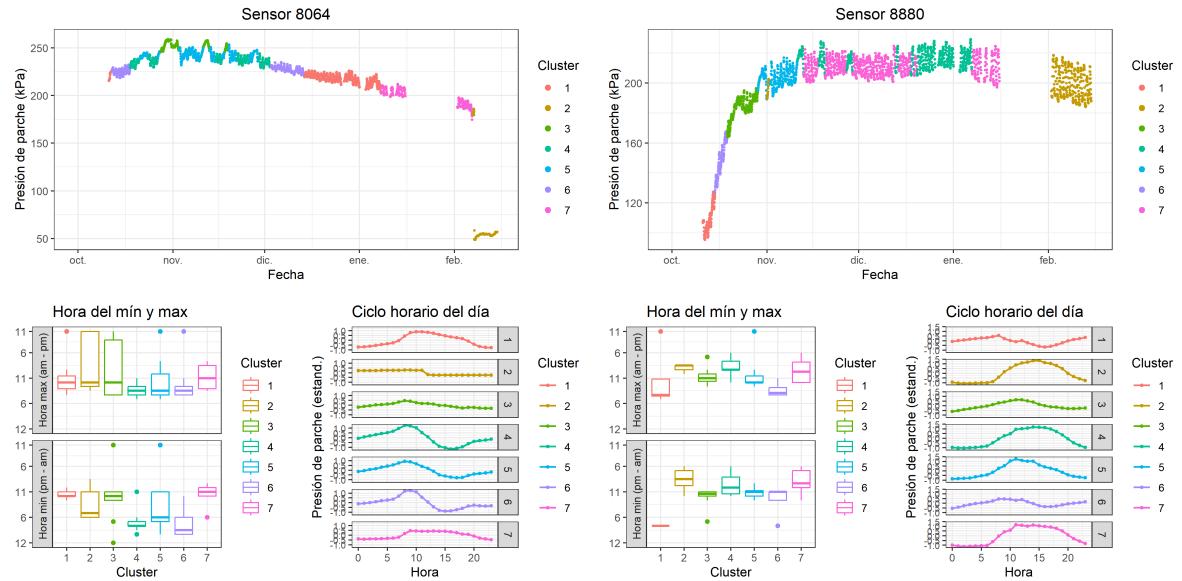
55 T1 (2023-2024)



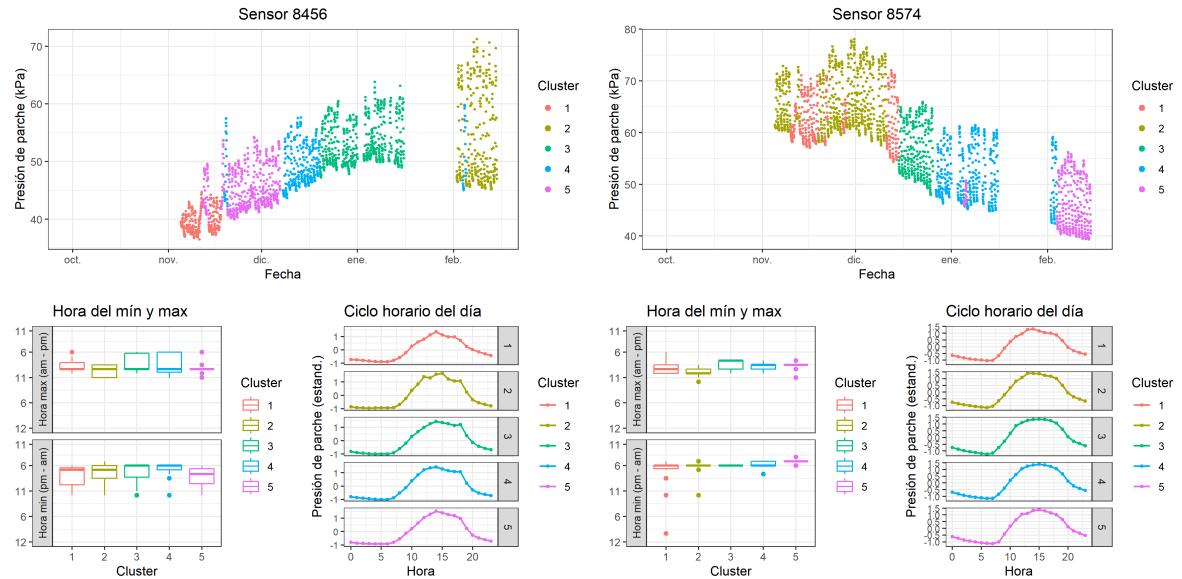


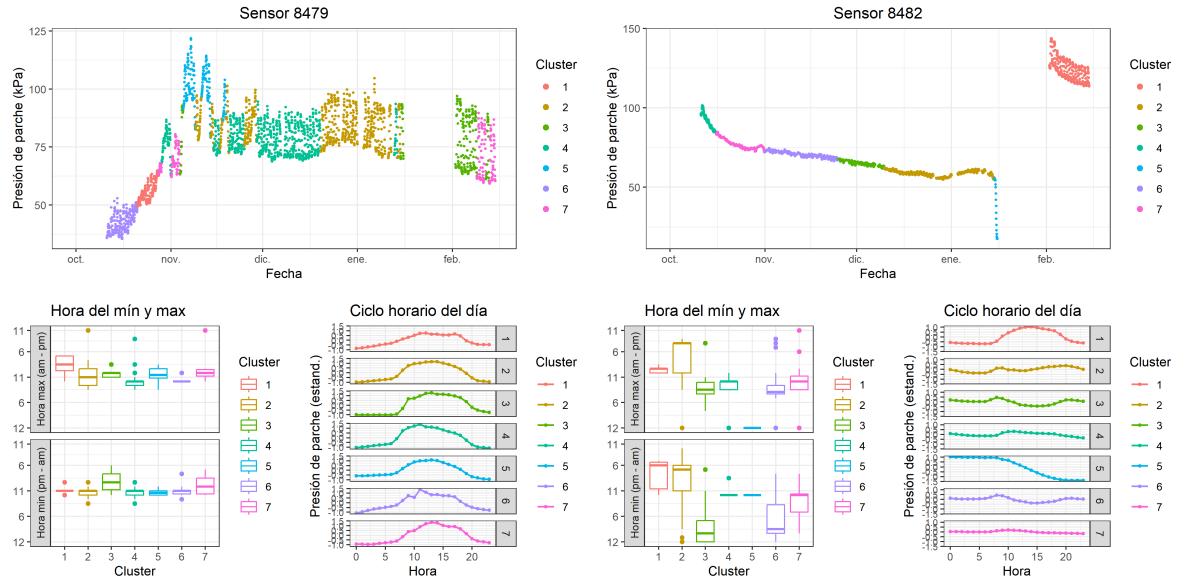
Unidad 3

56 T2 (2023-2024)



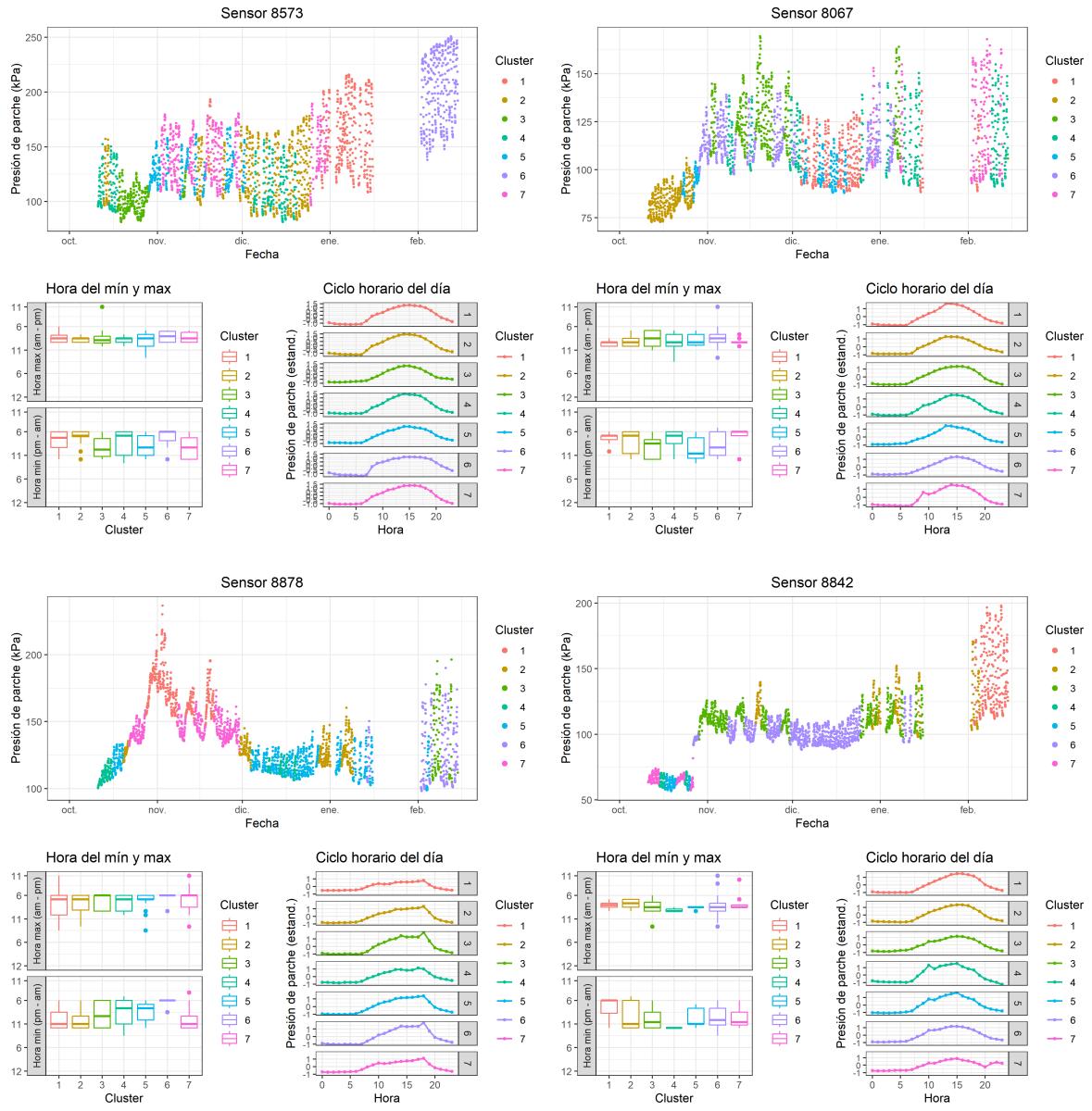
Unidad 1

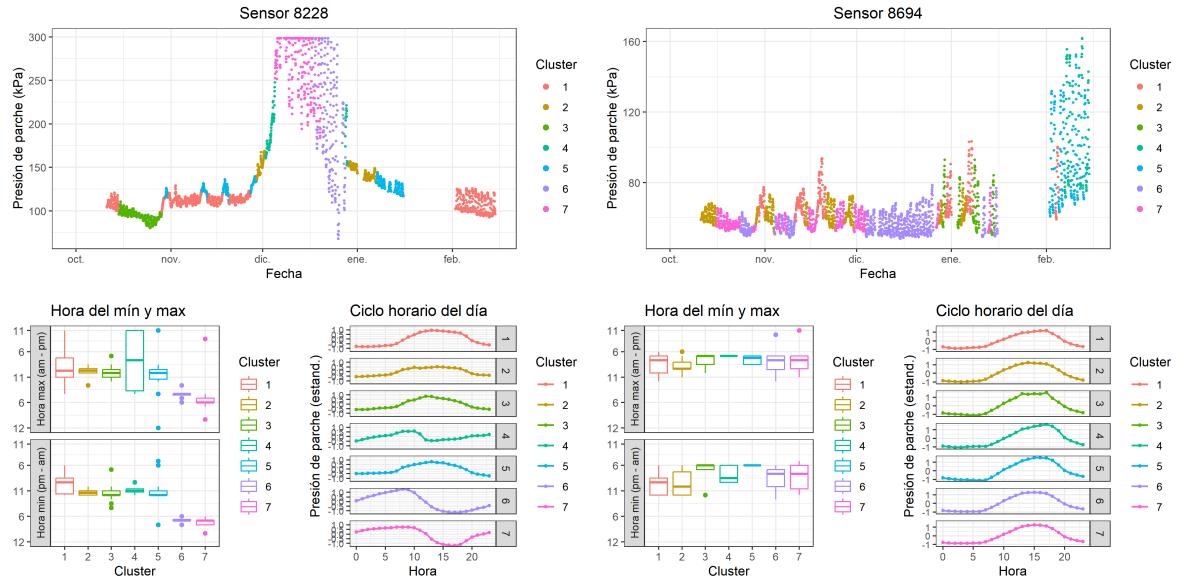




Unidad 3

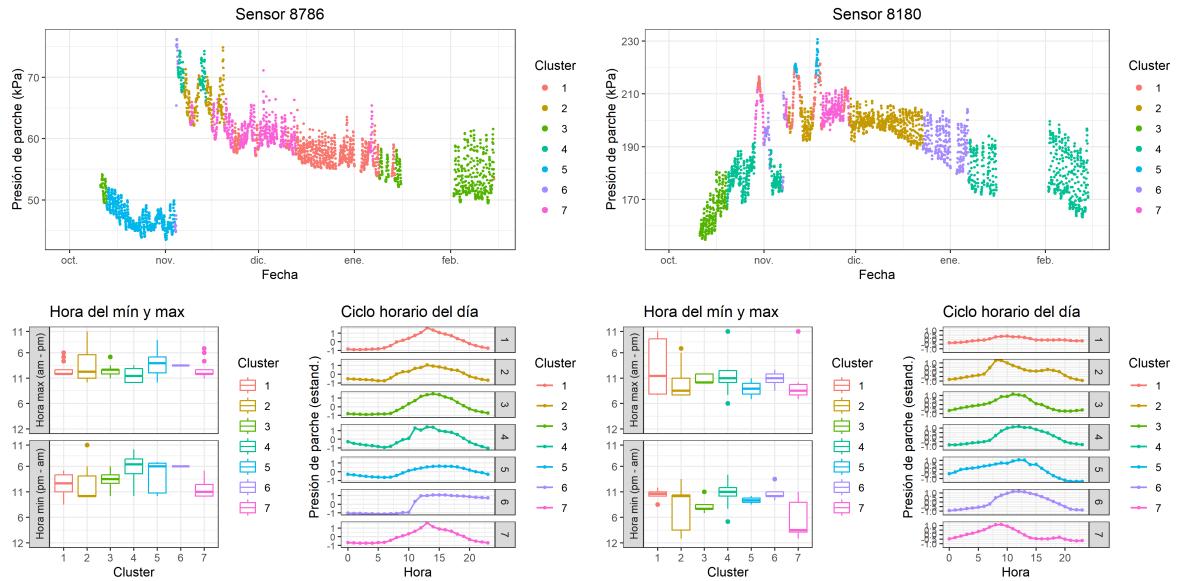
57 T3 (2023-2024)



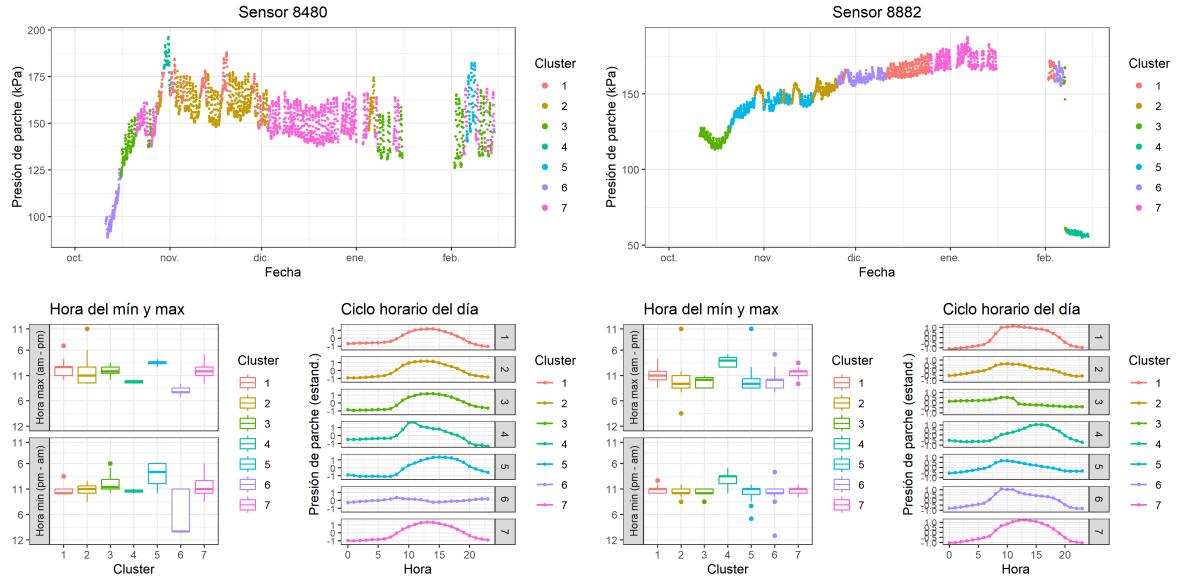


Unidad 3

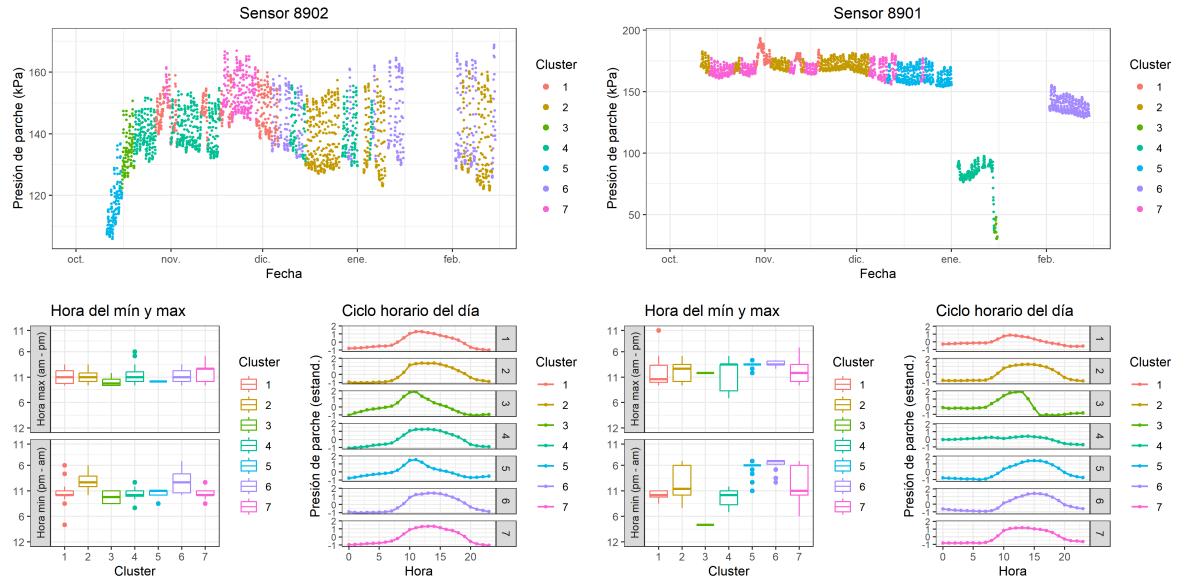
58 T4 (2023-2024)



Unidad 1



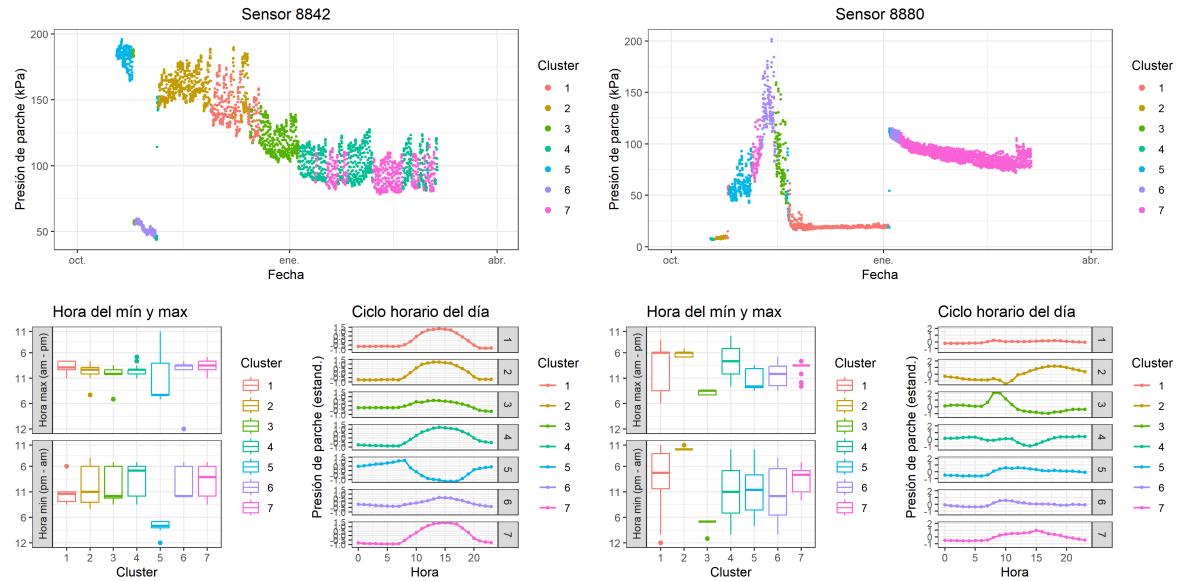
Unidad 2



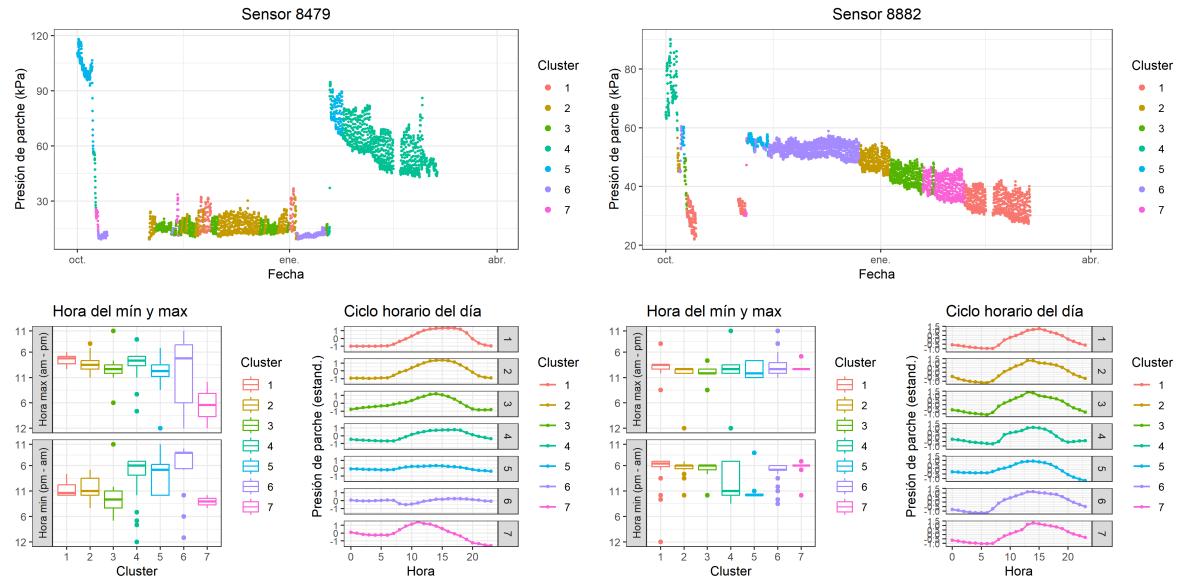
Unidad 3

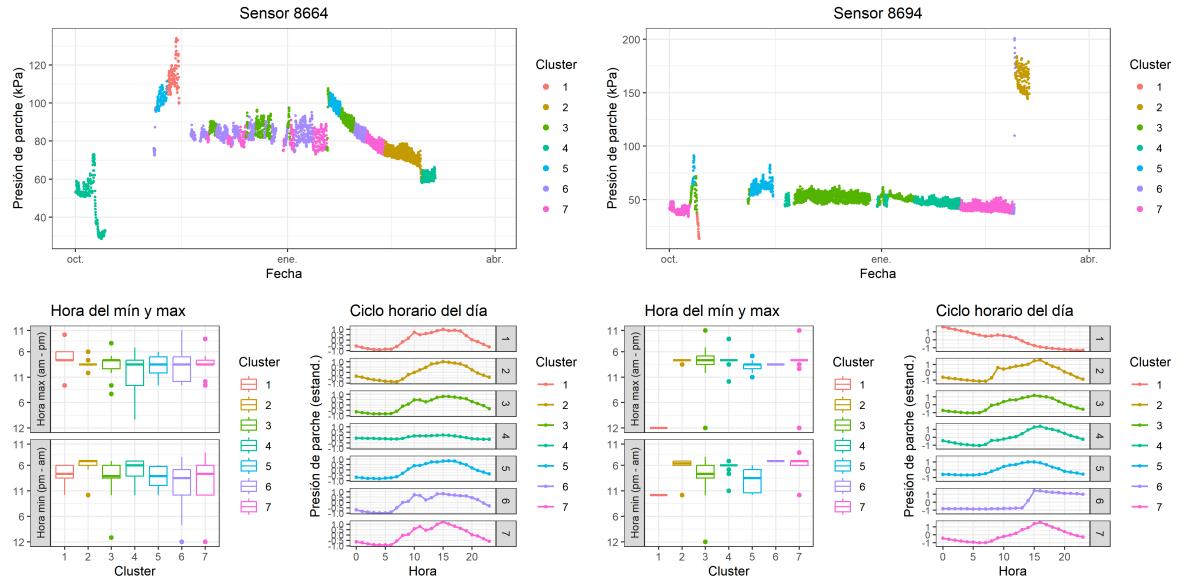
58.1 Rio Claro

59 T1 (2022-2023)



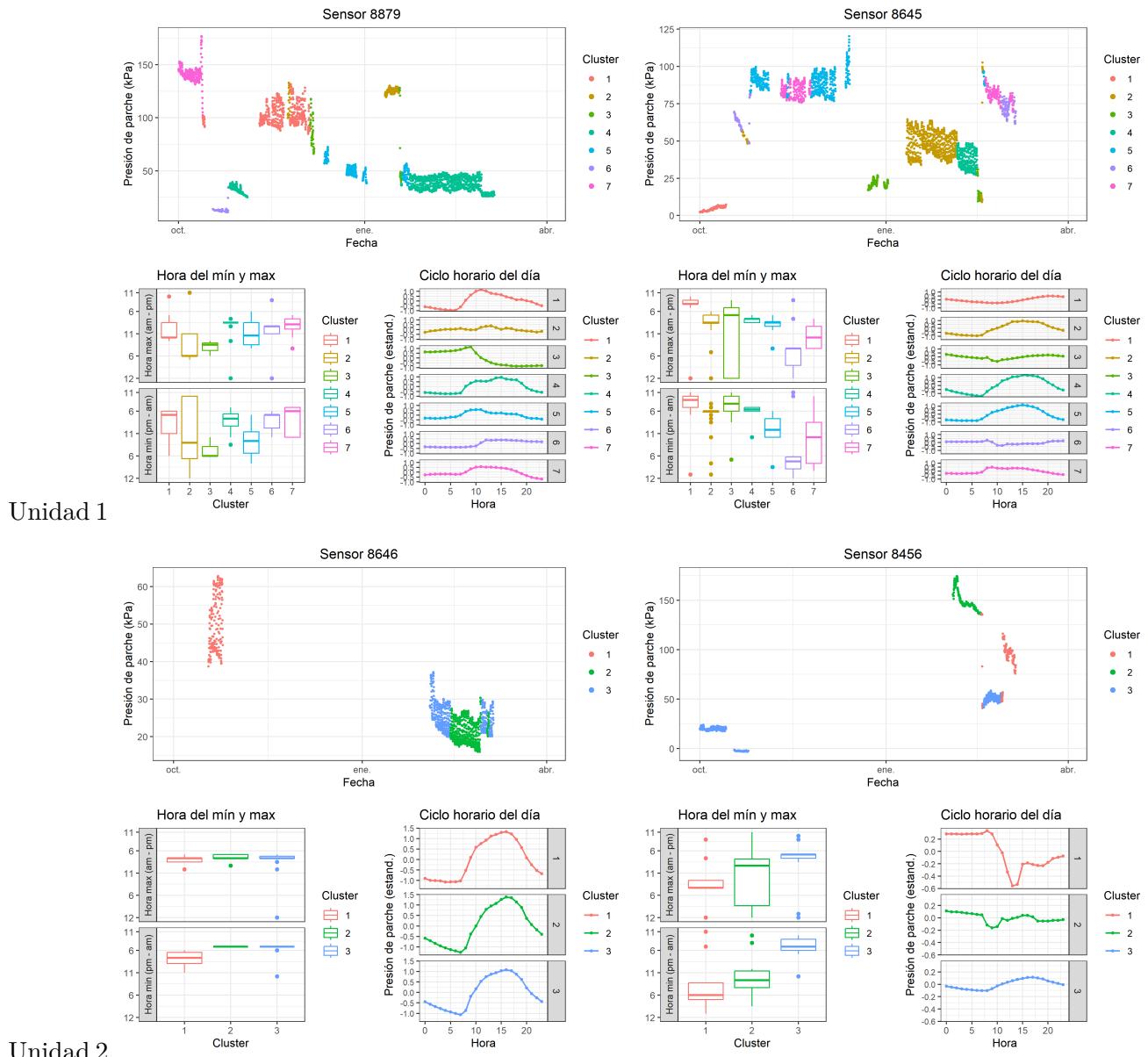
Unidad 1

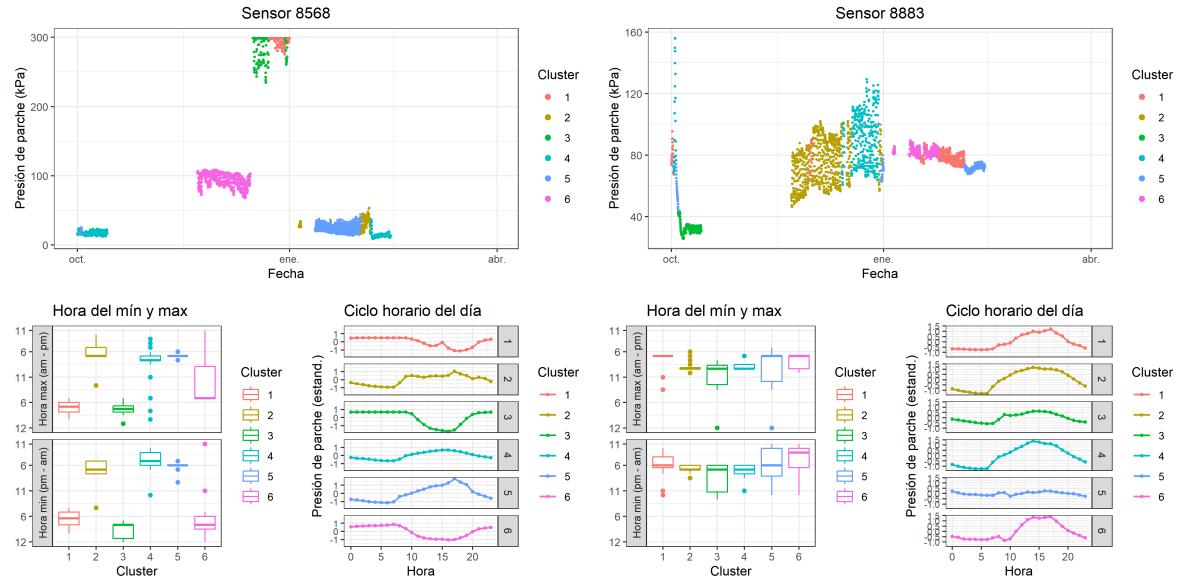




Unidad 3

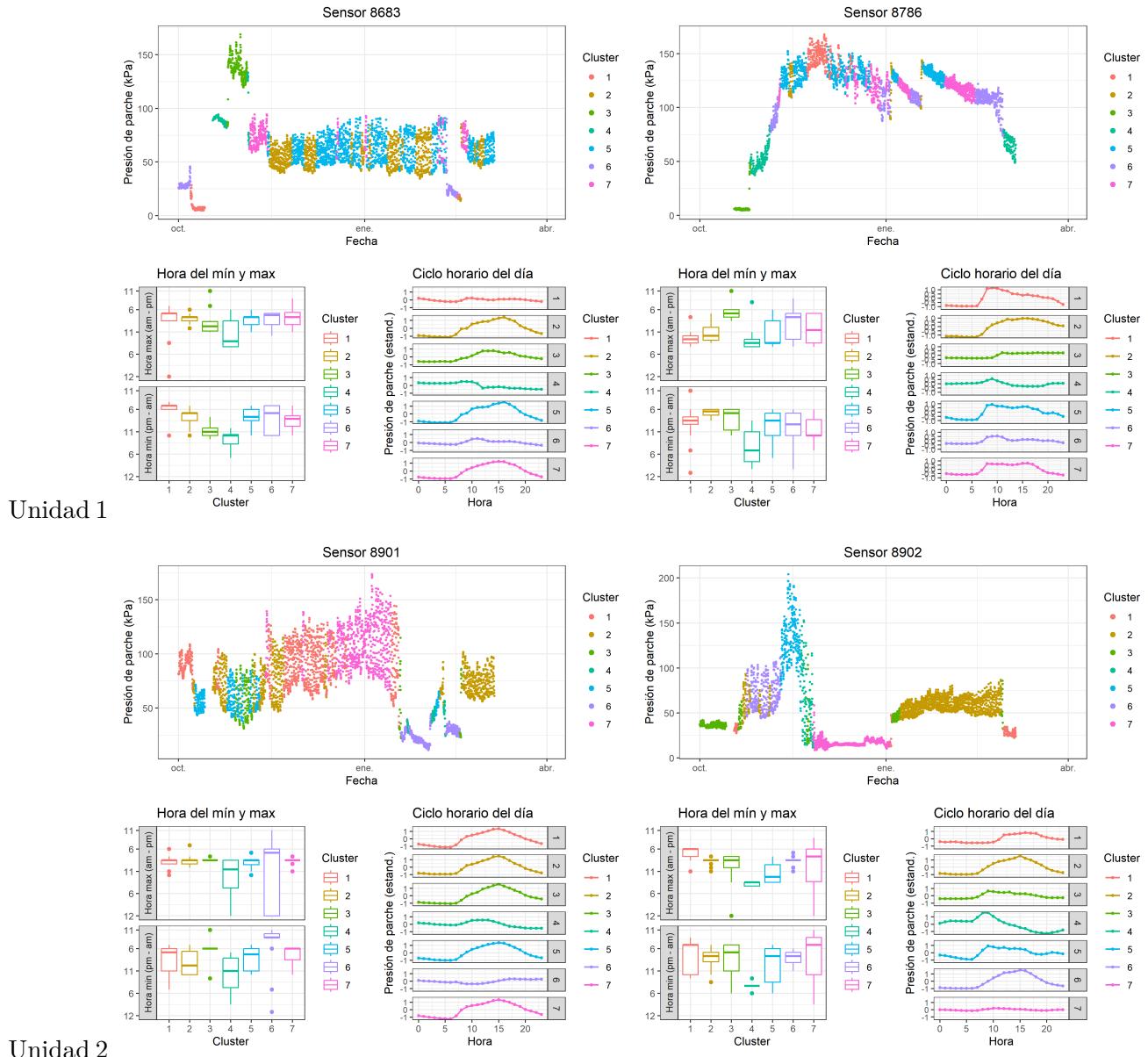
60 T2 (2022-2023)

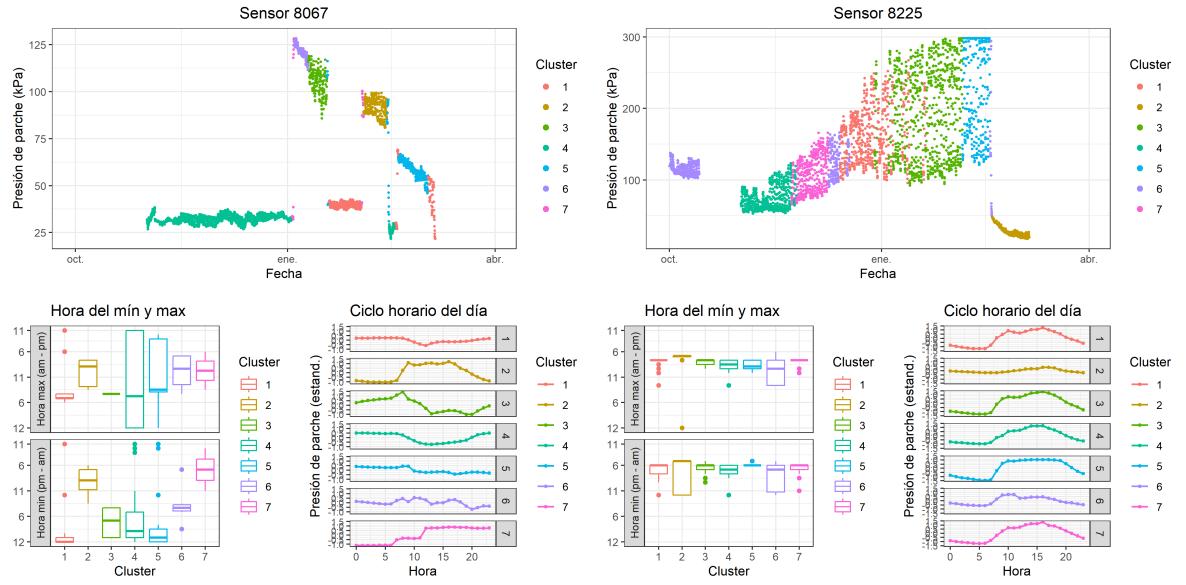




Unidad 3

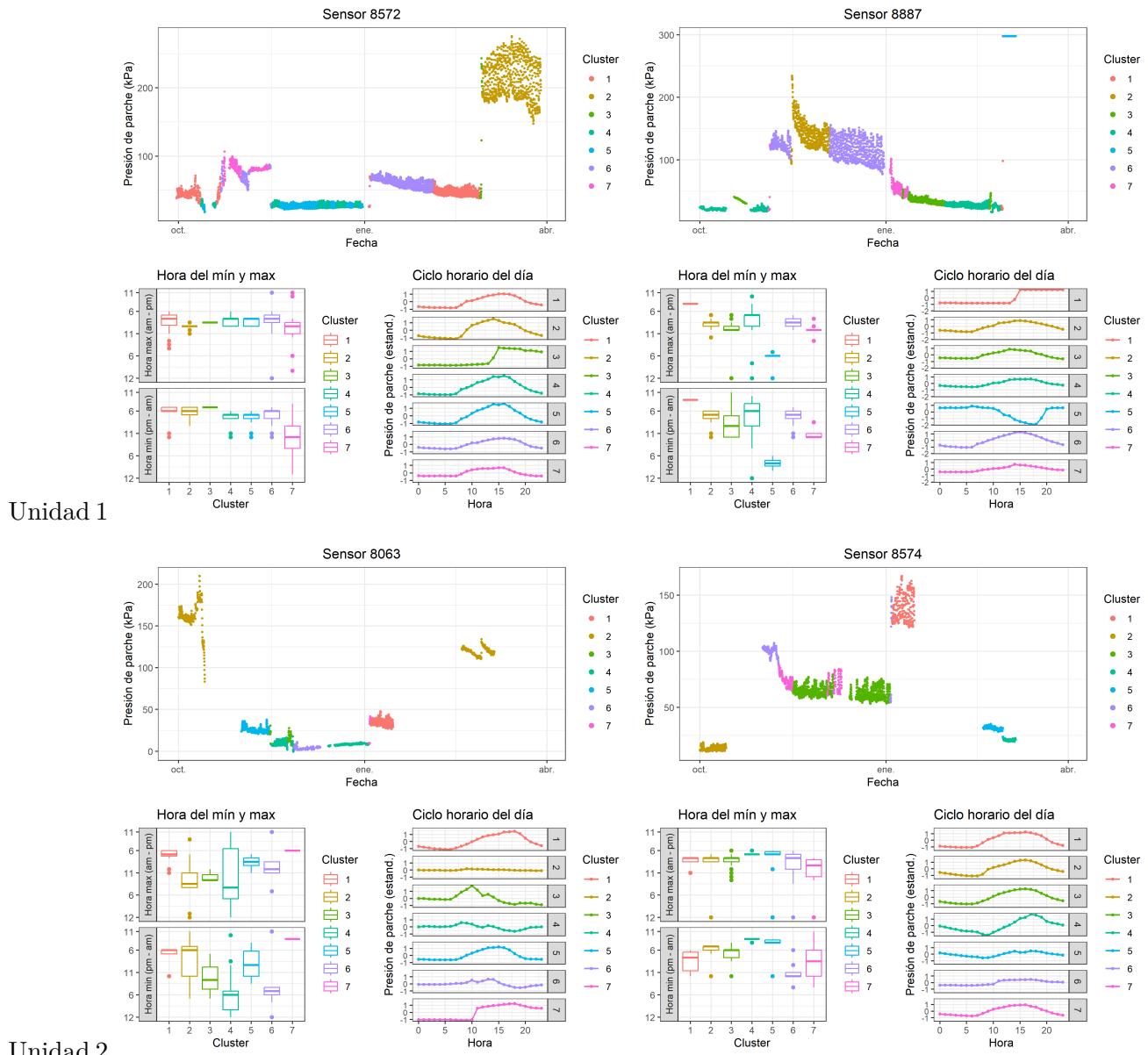
61 T3 (2022-2023)

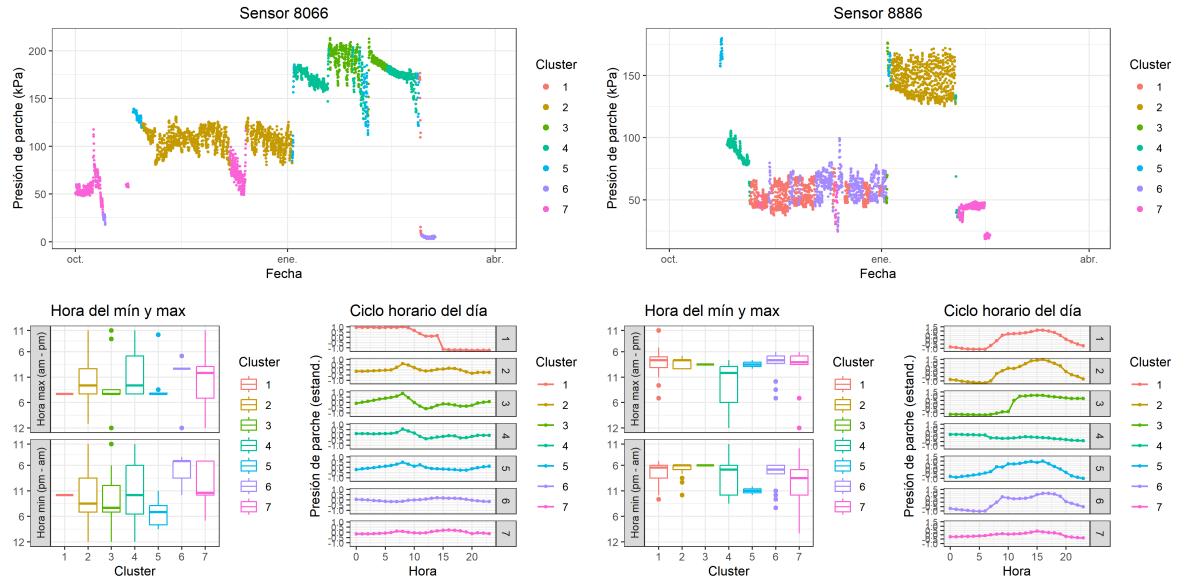




Unidad 3

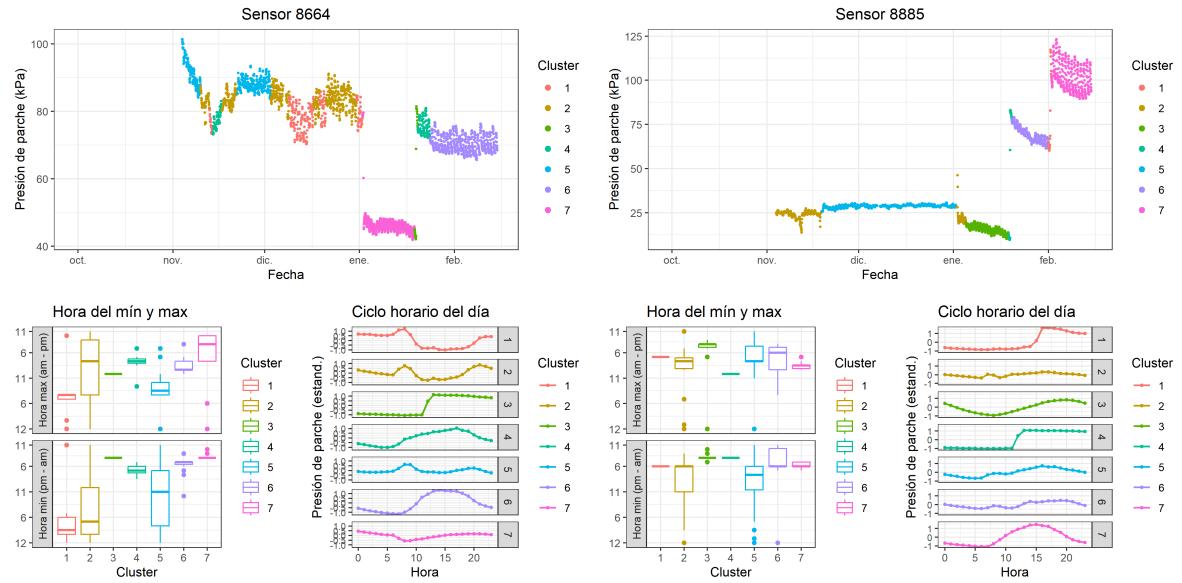
62 T4 (2022-2023)



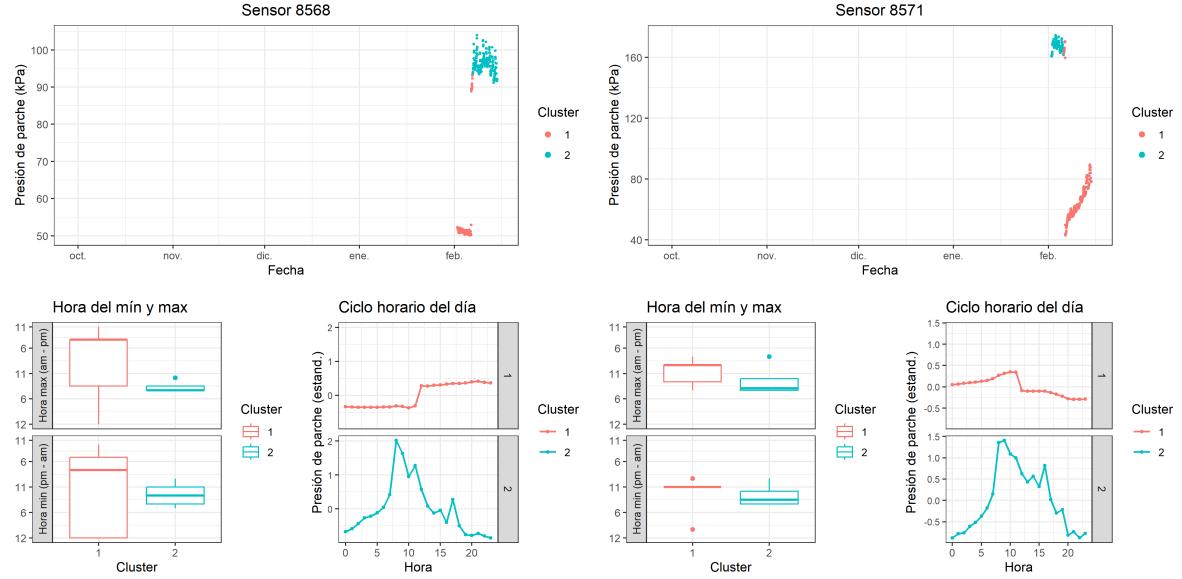


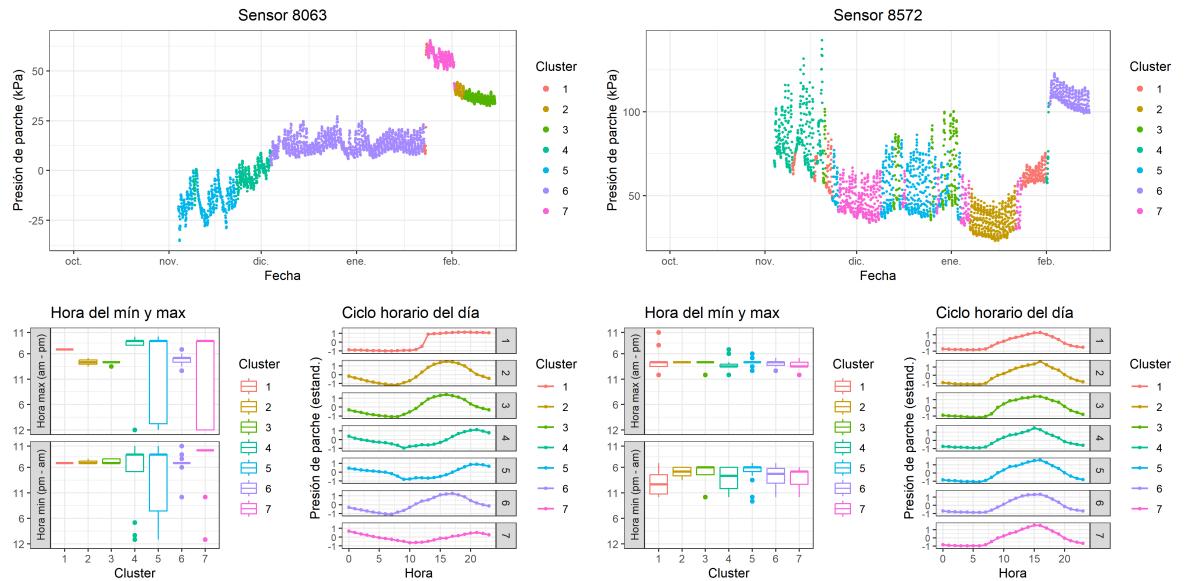
Unidad 3

63 T1 (2023-2024)



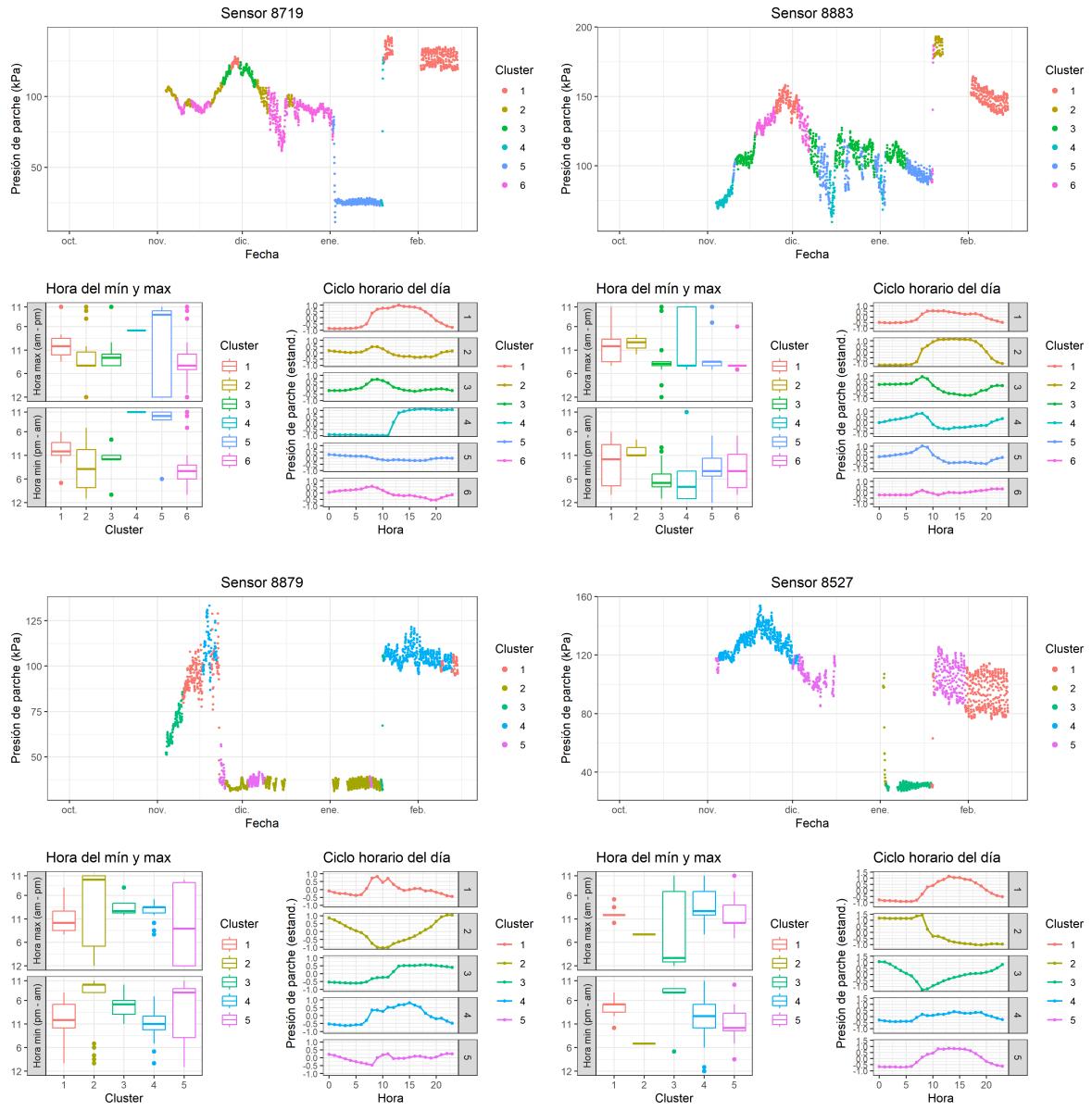
Unidad 1

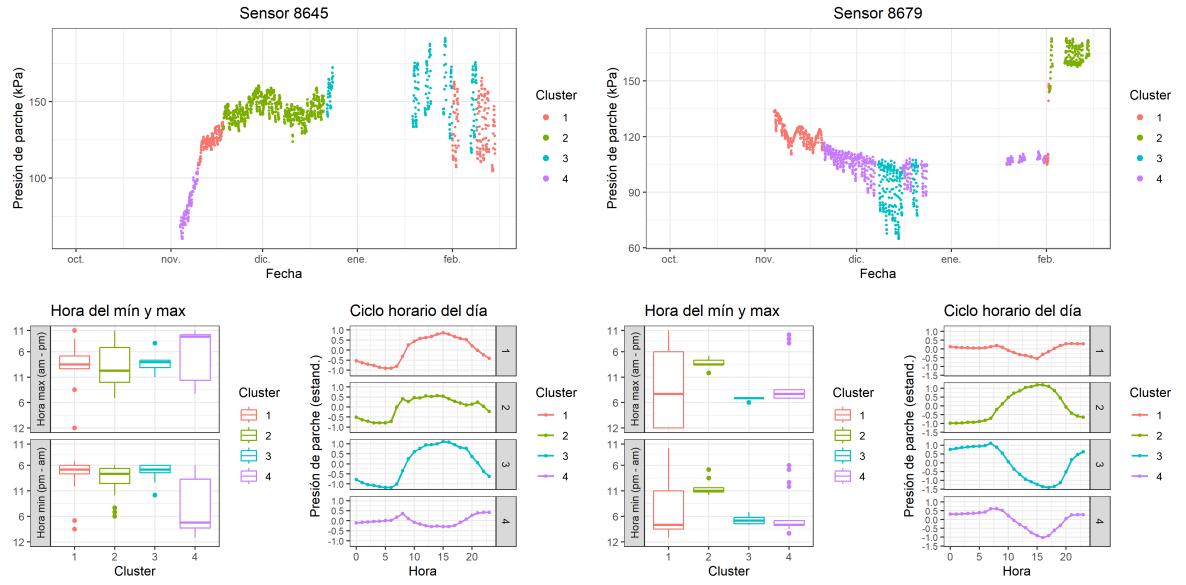




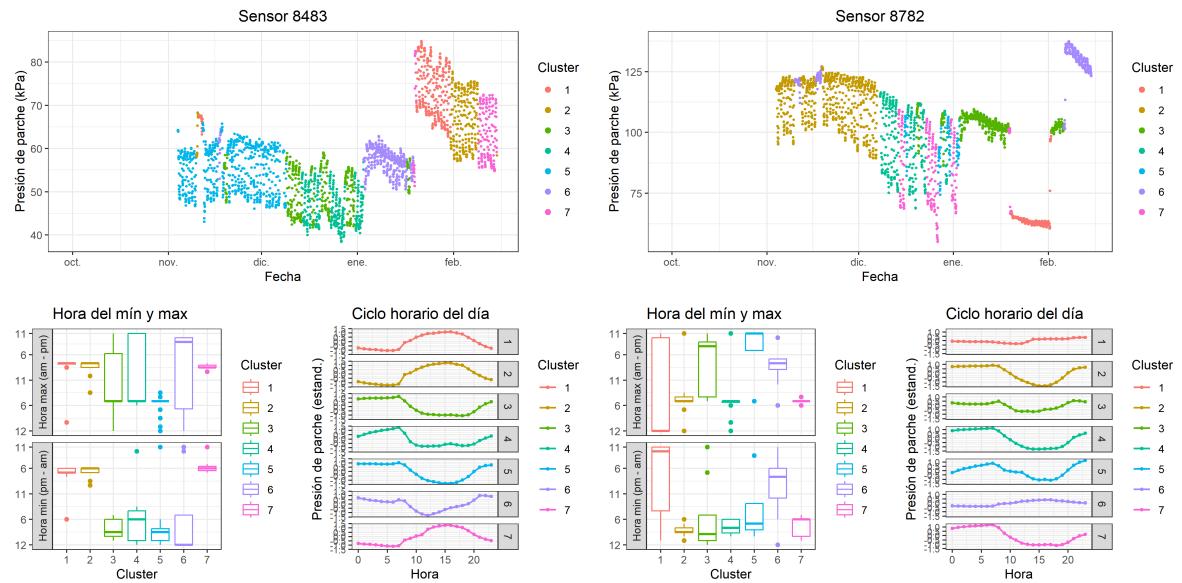
Unidad 3

64 T2 (2023-2024)

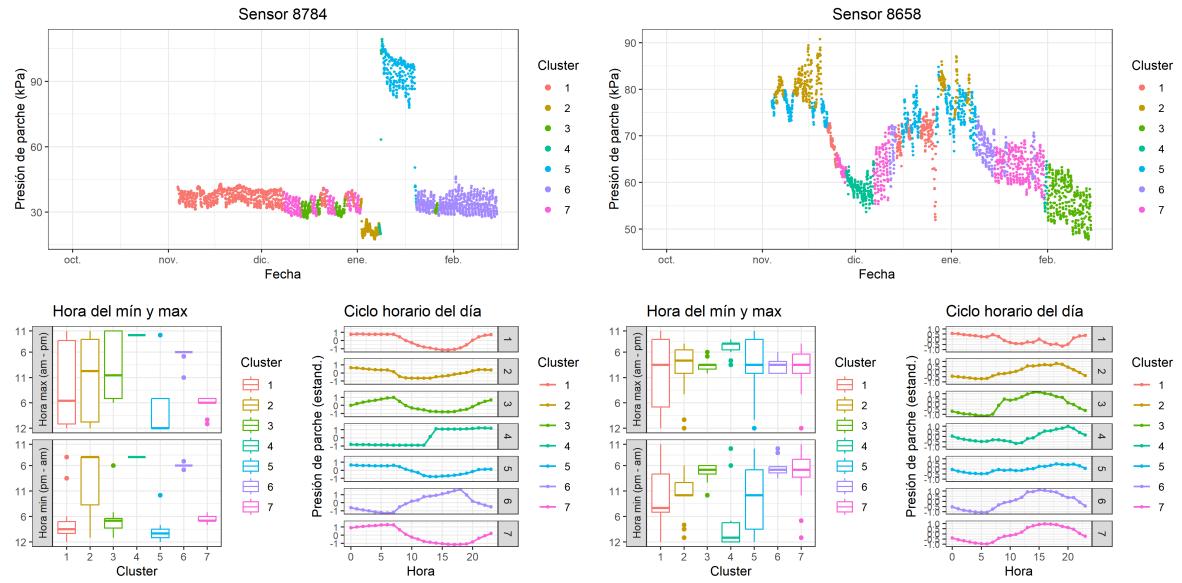


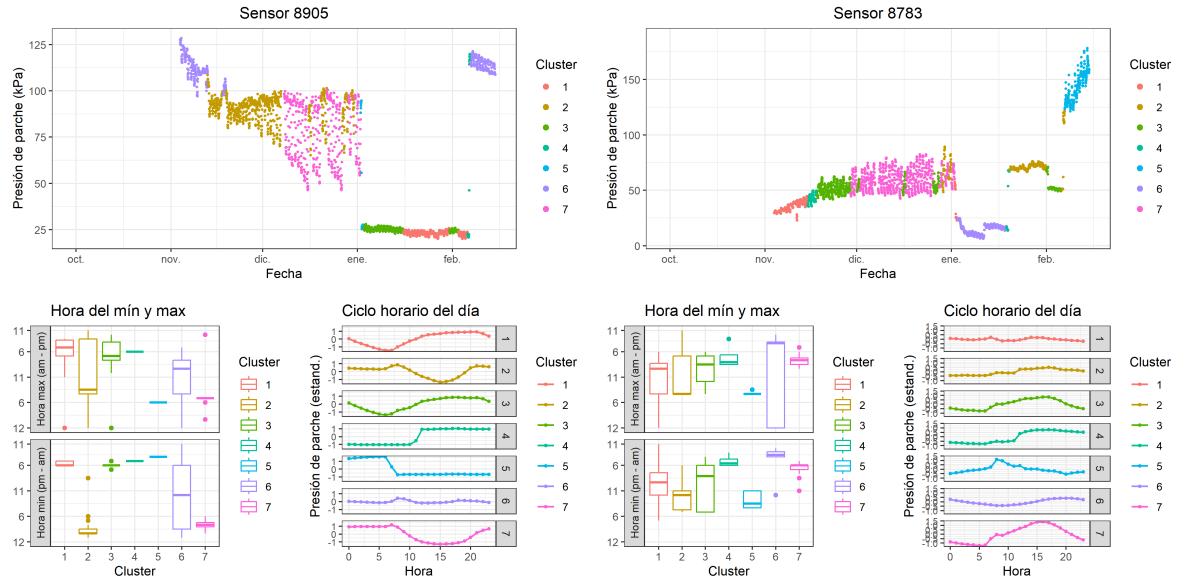


65 T3 (2023-2024)



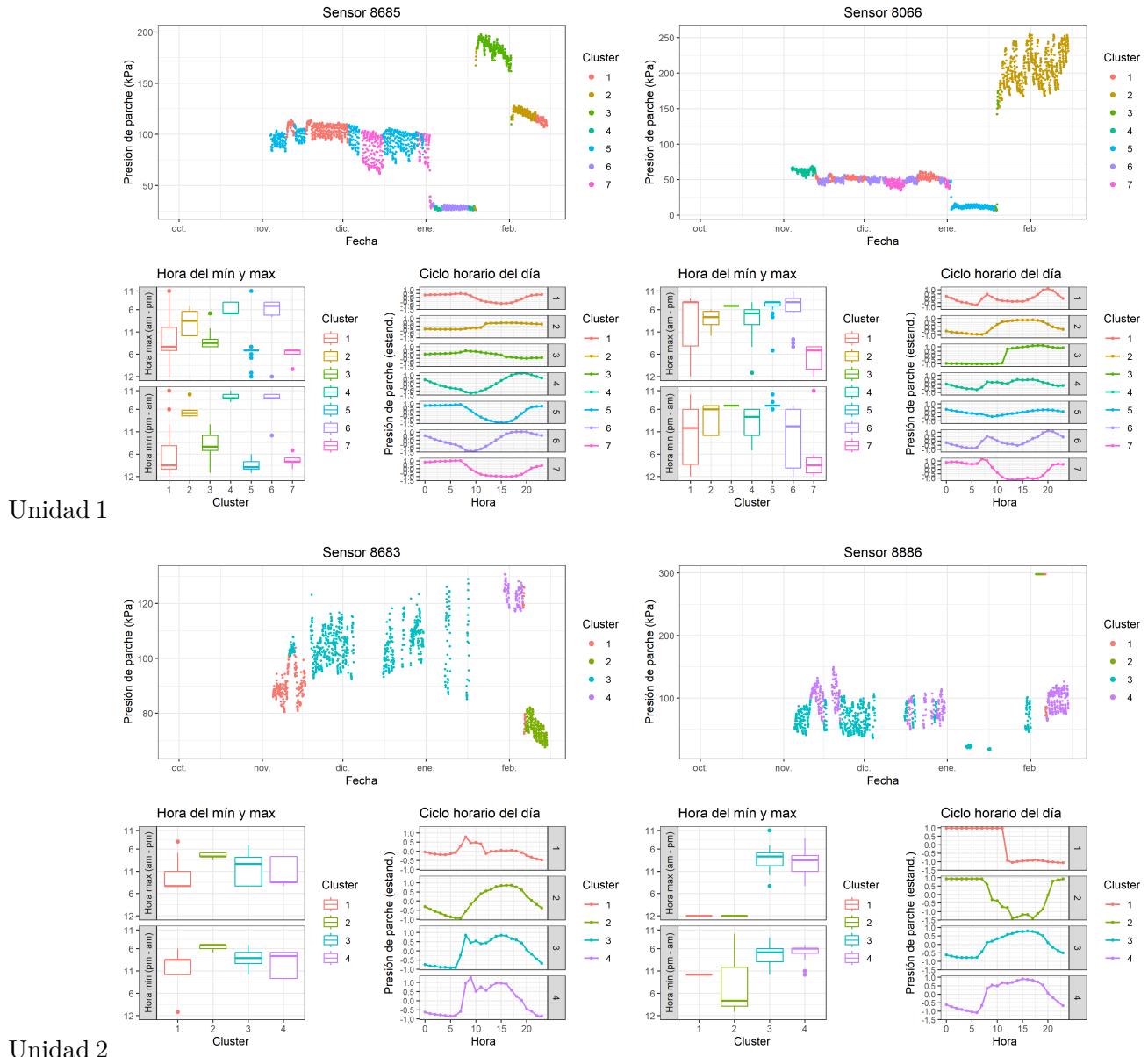
Unidad 1

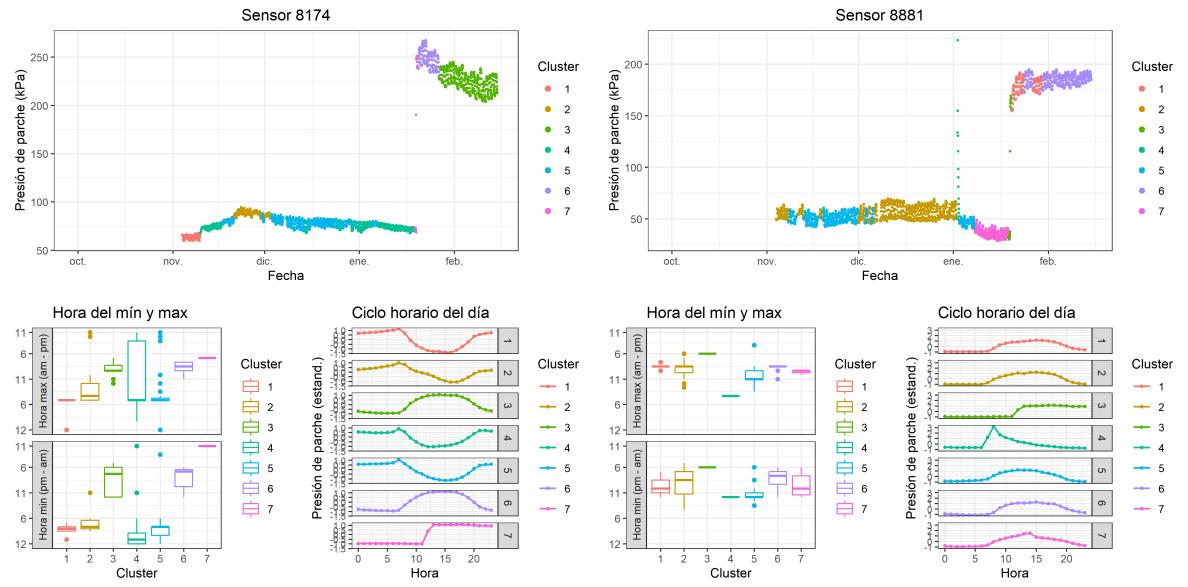




Unidad 3

66 T4 (2023-2024)





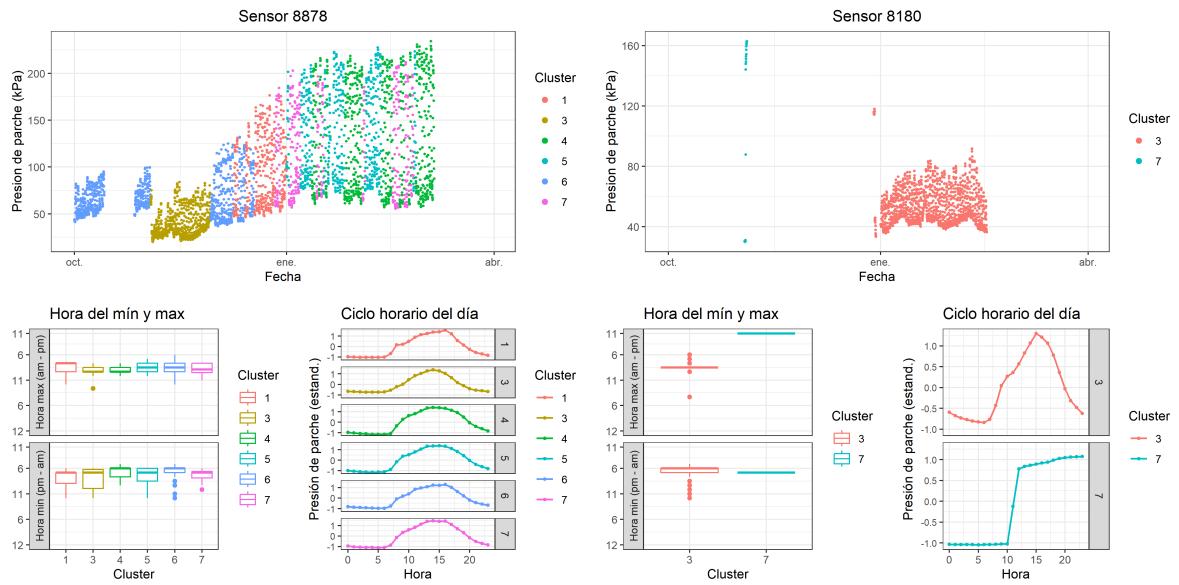
Unidad 3

67 Limpieza de datos: eliminación de clusters

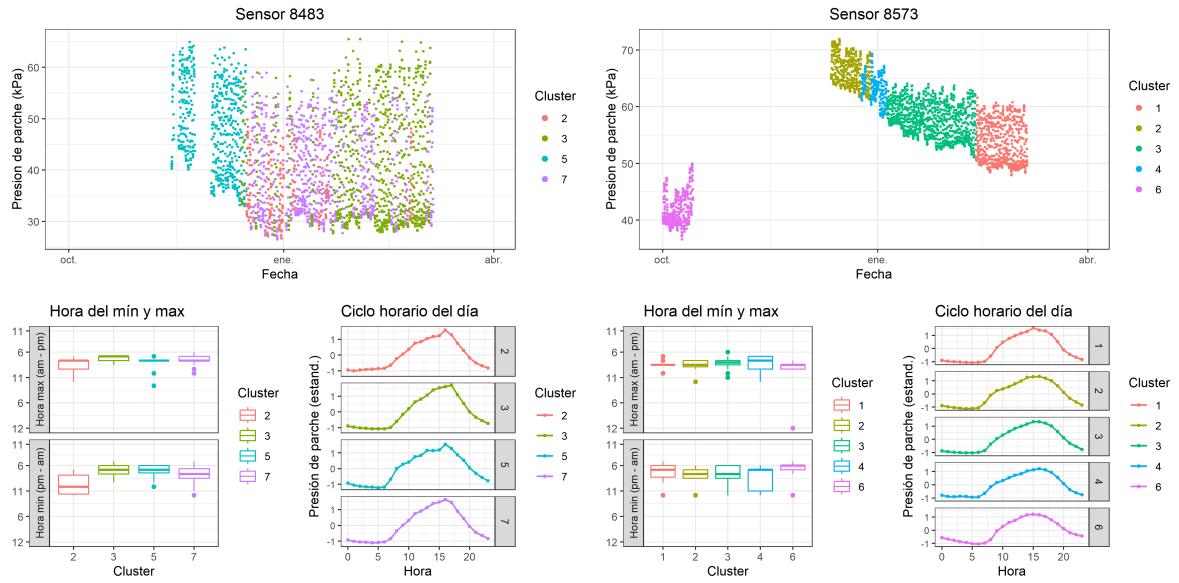
Para limpiar los datos de turgor, se emplearon series temporales de VPD y temperatura provenientes de las estaciones meteorológicas de los dos sitios de estudio. Se procedió a calcular el coeficiente de correlación entre cada cluster y los valores de VPD y temperatura respecto al tiempo (escala horaria) y el sitio. Se obtuvo un coeficiente de correlación promedio en relación con ambas variables, y se estableció un umbral de corte de $r > 0.5$. Aquellos clusters de turgor cuyo promedio de correlación resultó menor a 0.5 fueron descartados.

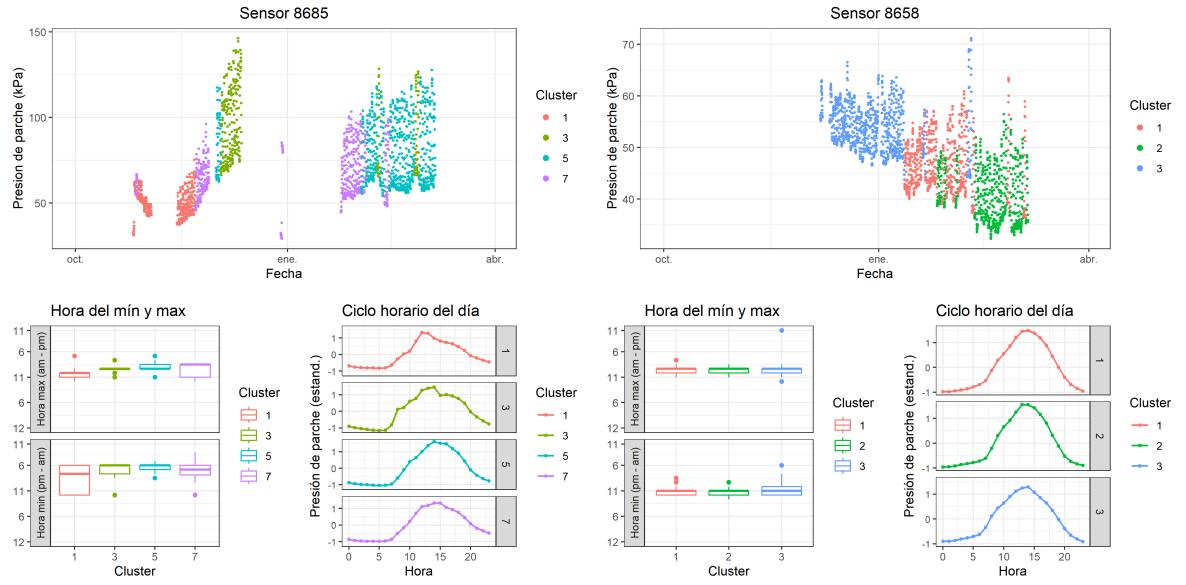
67.1 La Esperanza

68 T1 (2022-2023)



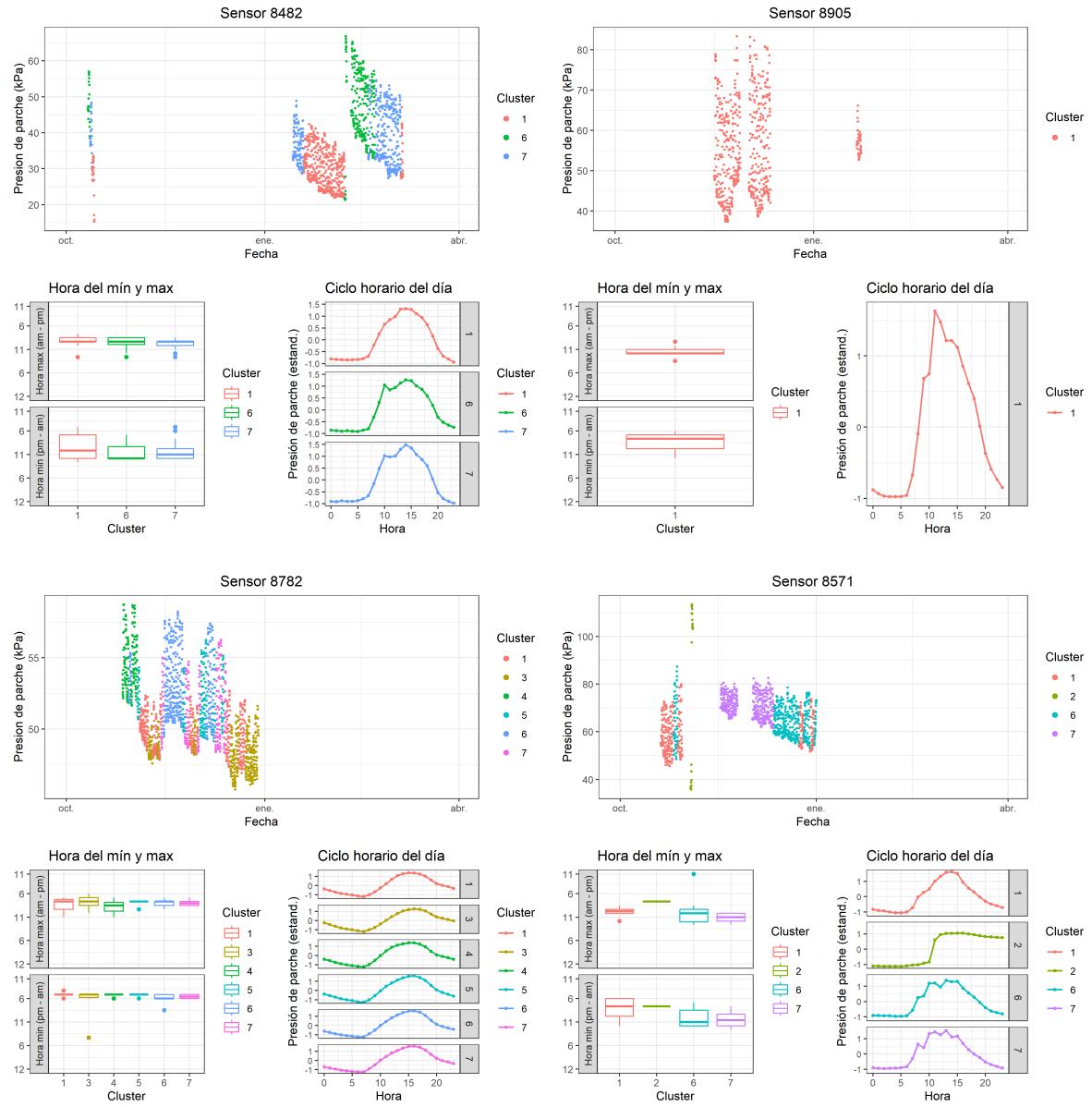
Unidad 1

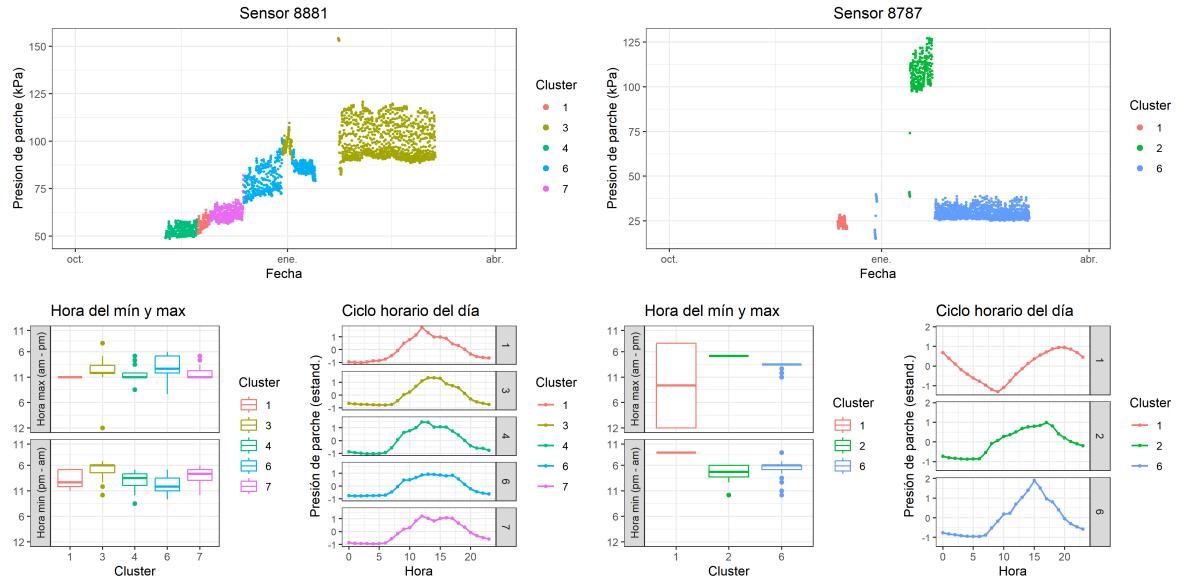




Unidad 3

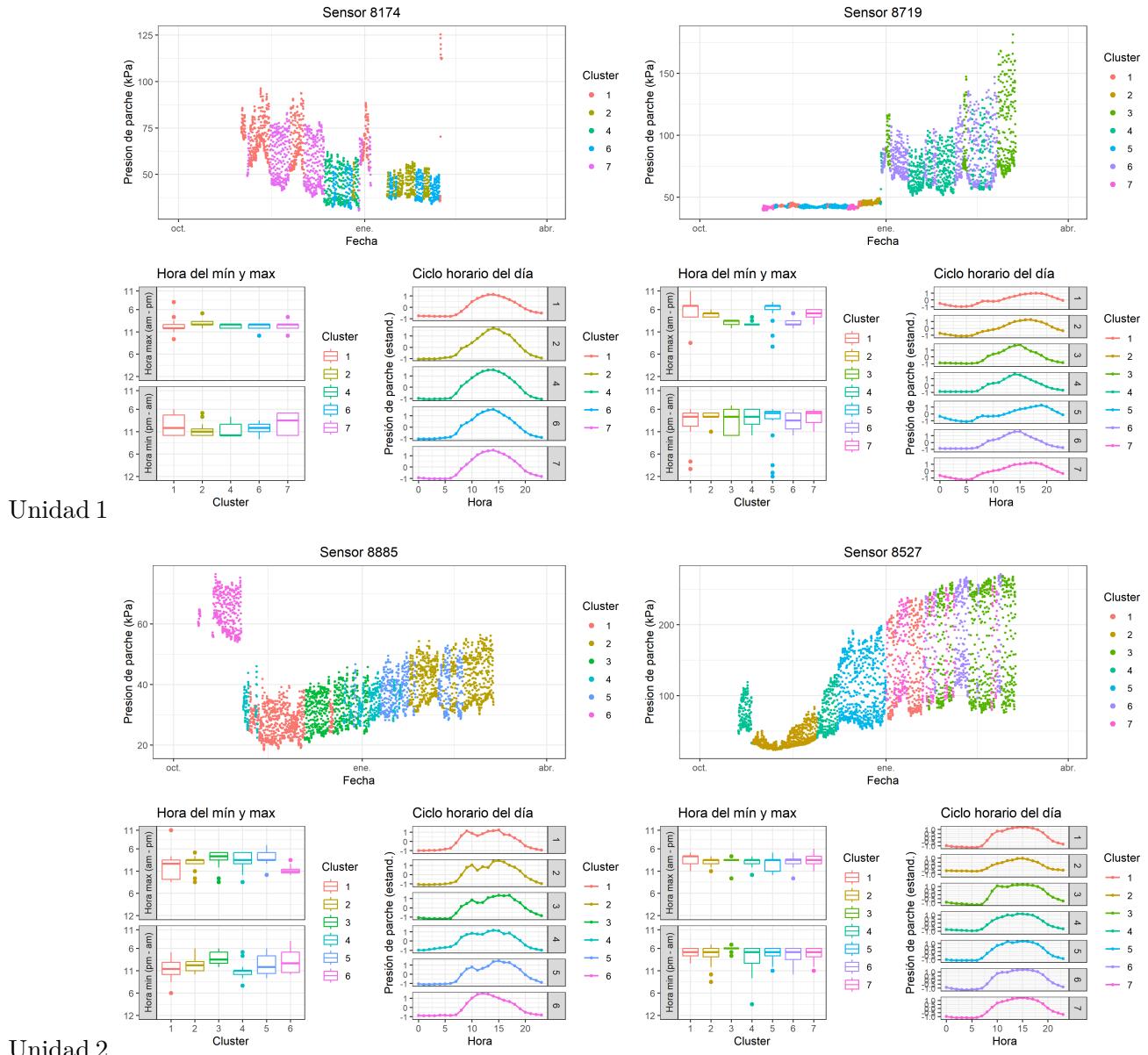
69 T2 (2022-2023)

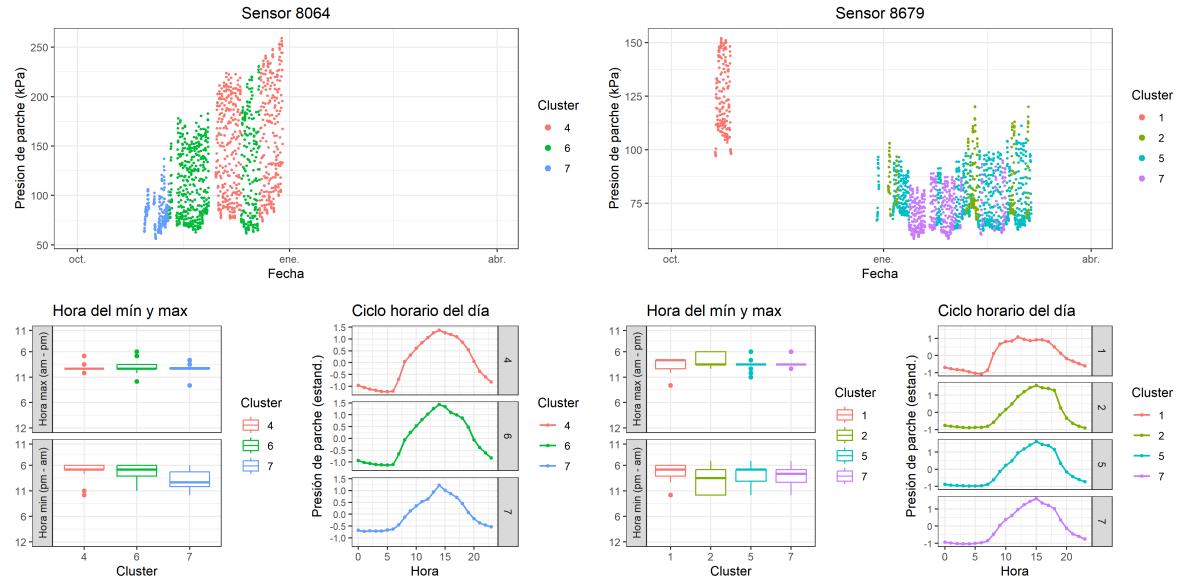




Unidad 3

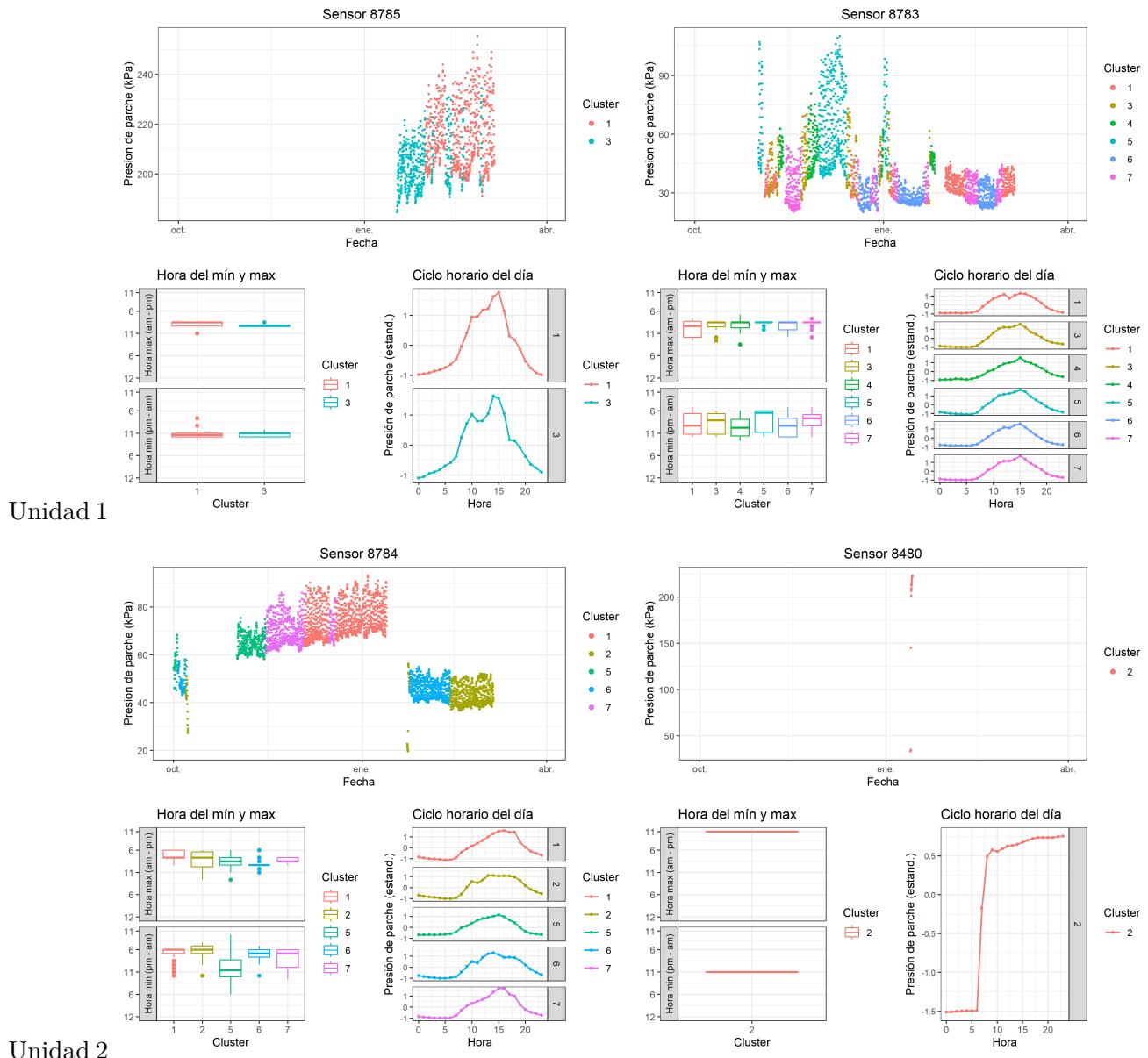
70 T3 (2022-2023)

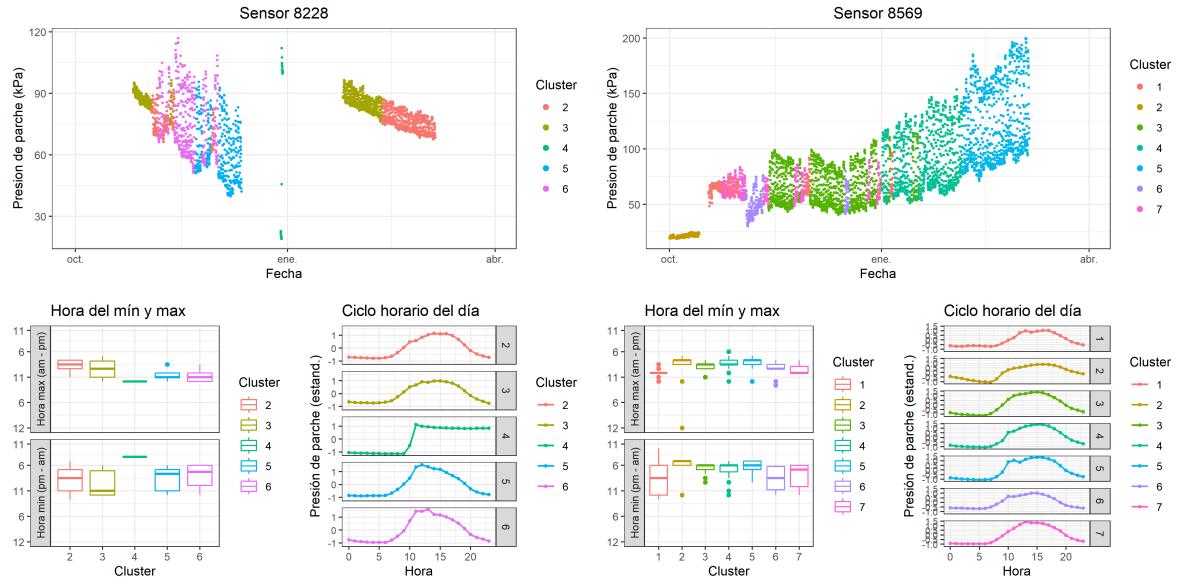




Unidad 3

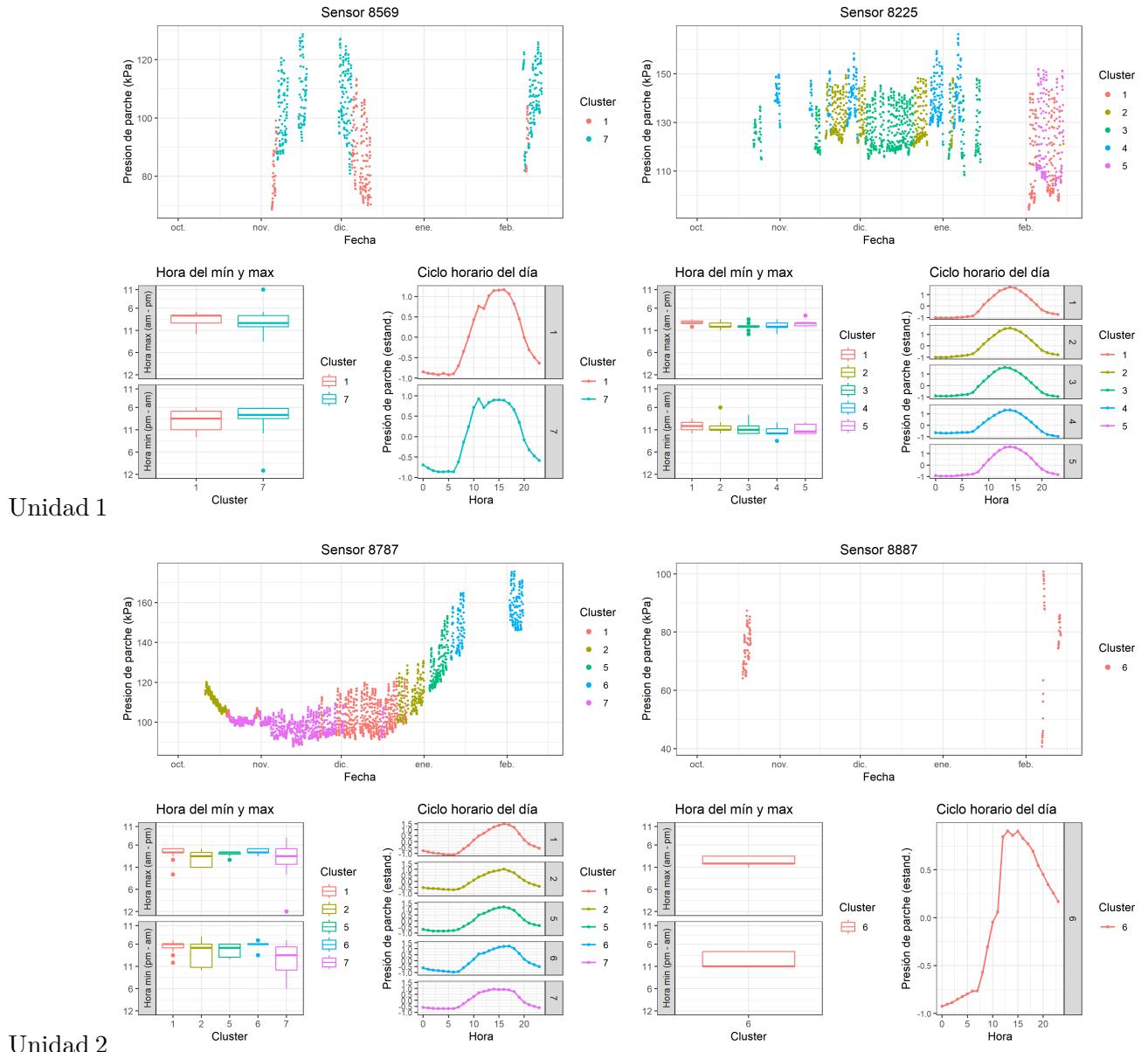
71 T4 (2022-2023)

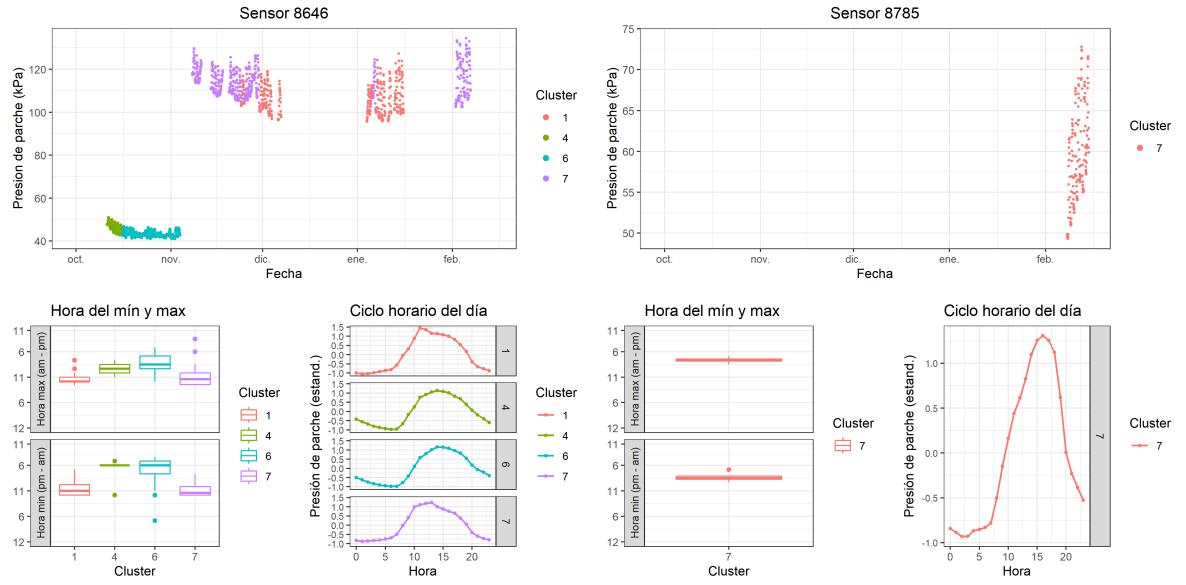




Unidad 3

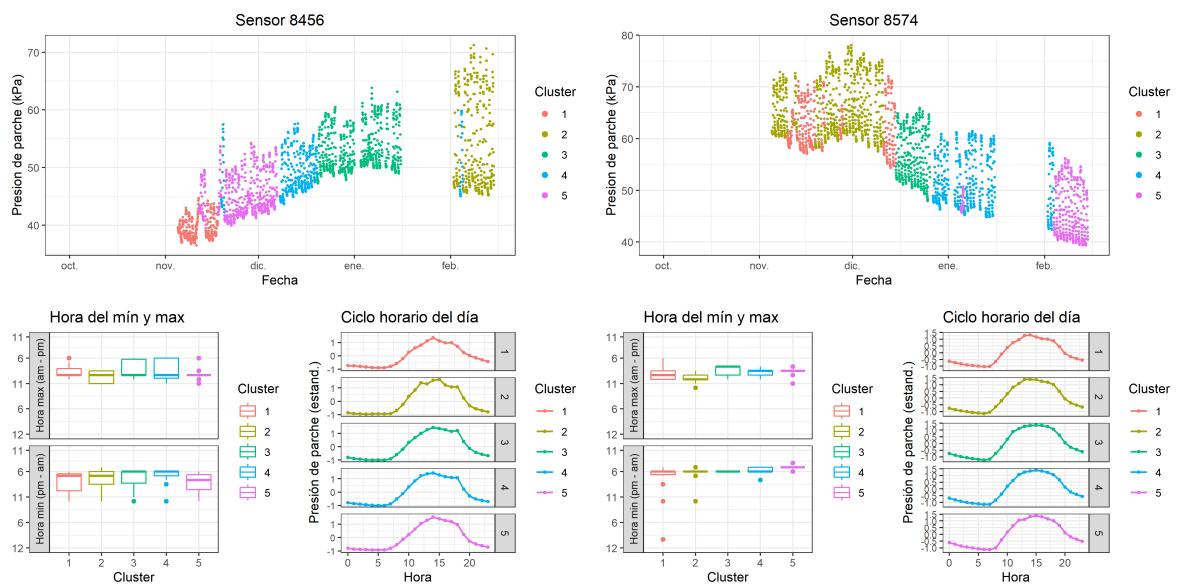
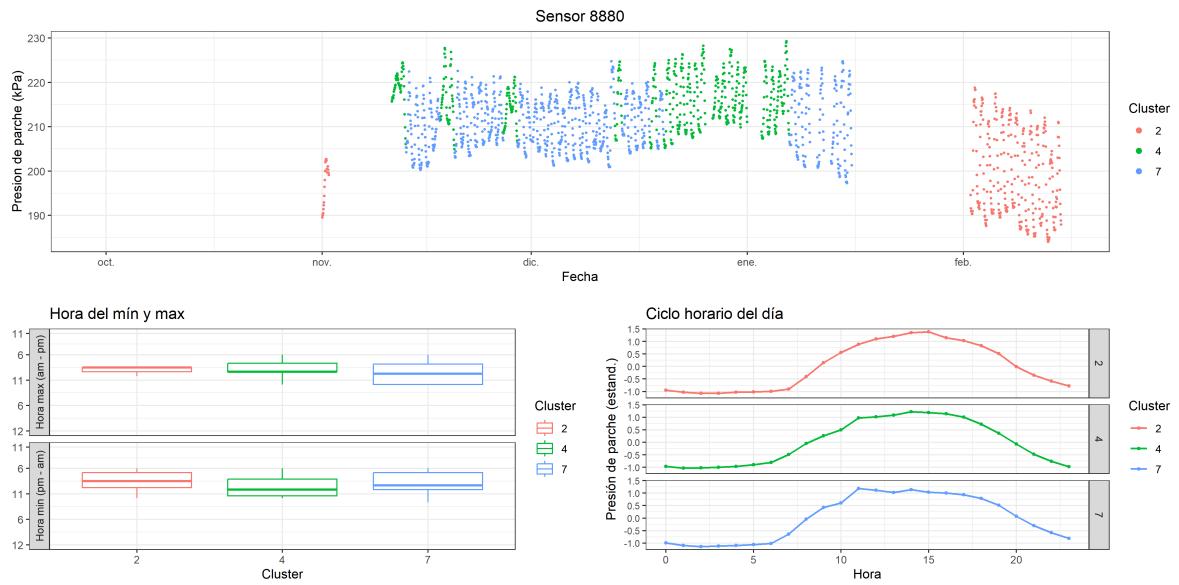
72 T1 (2023-2024)

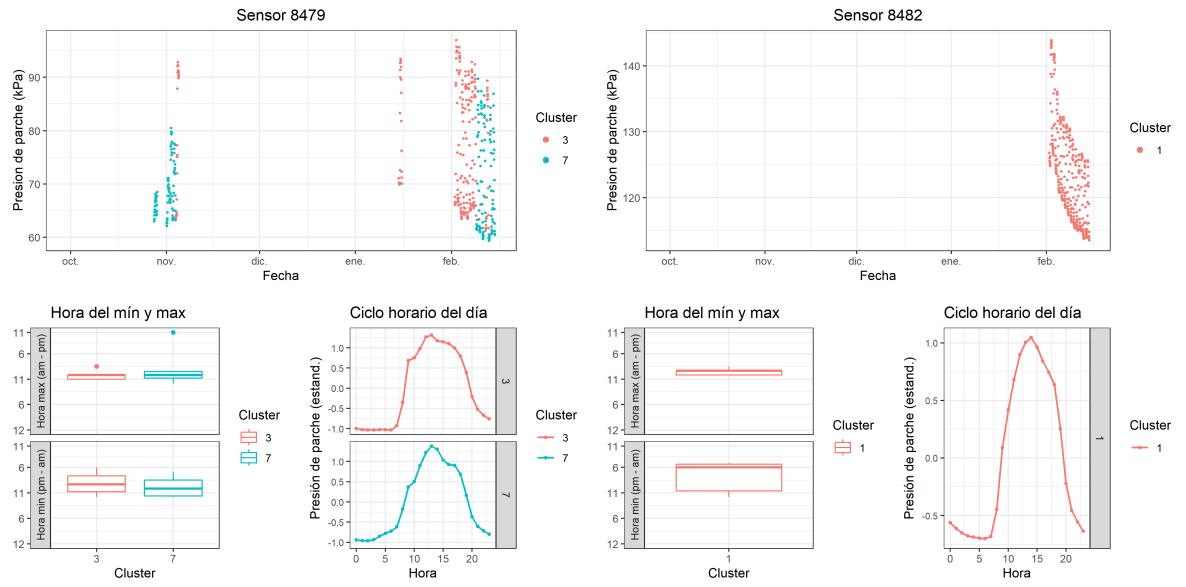




Unidad 3

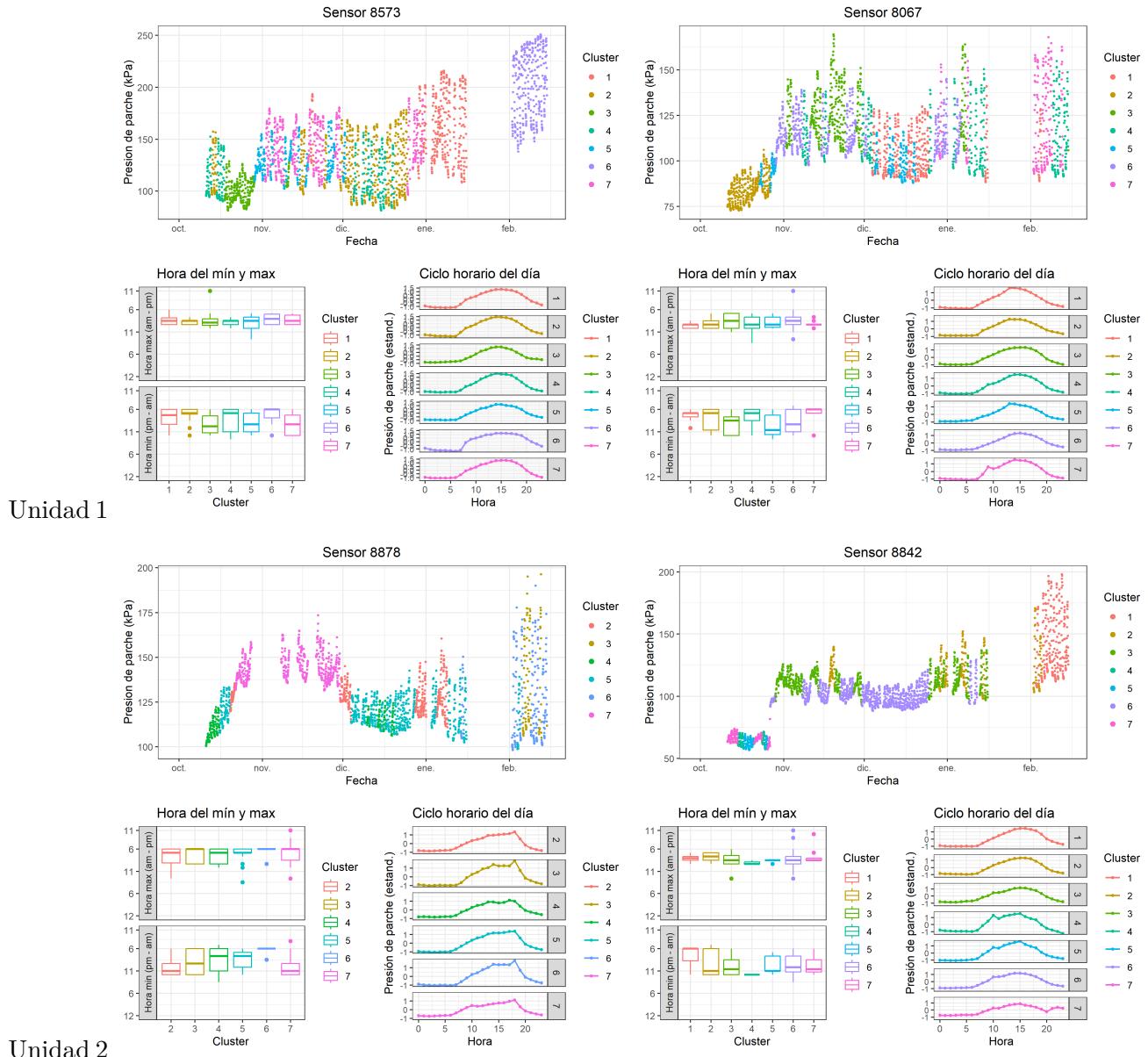
73 T2 (2023-2024)

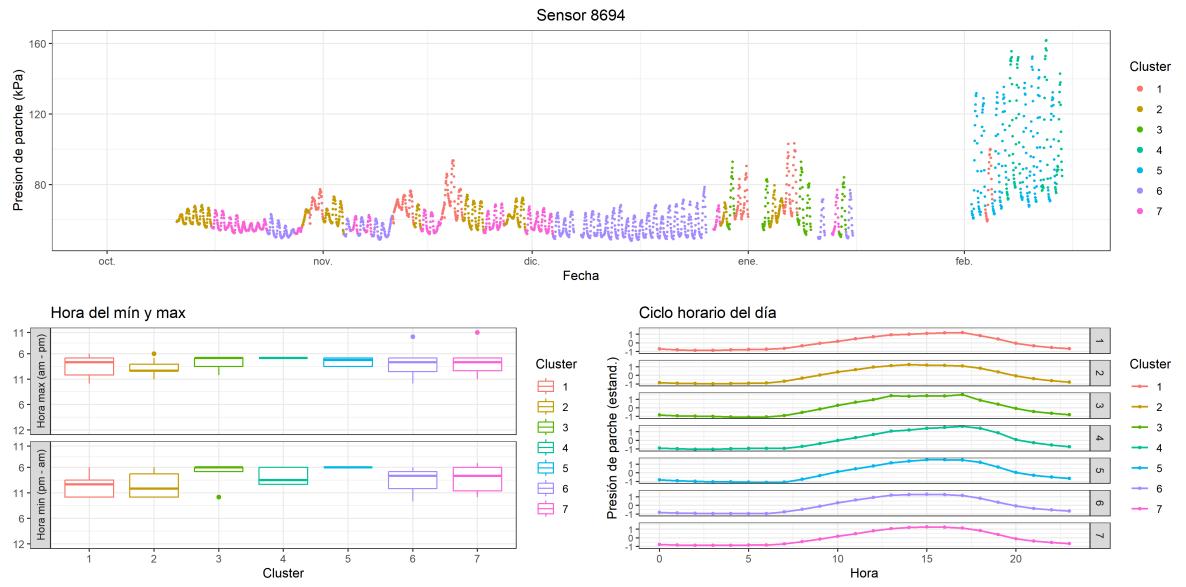




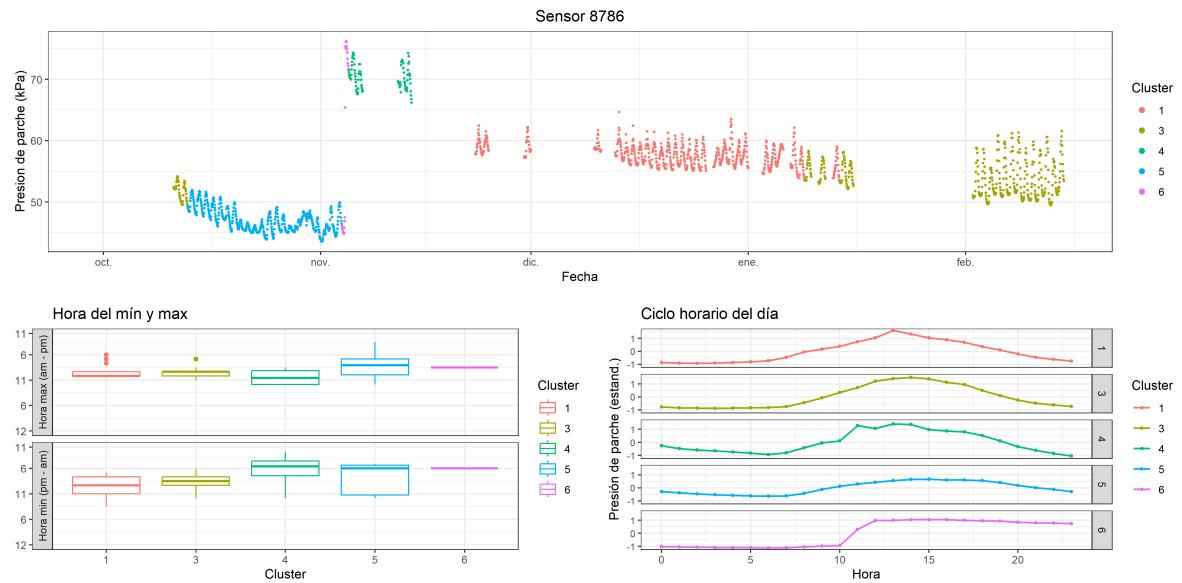
Unidad 3

74 T3 (2023-2024)

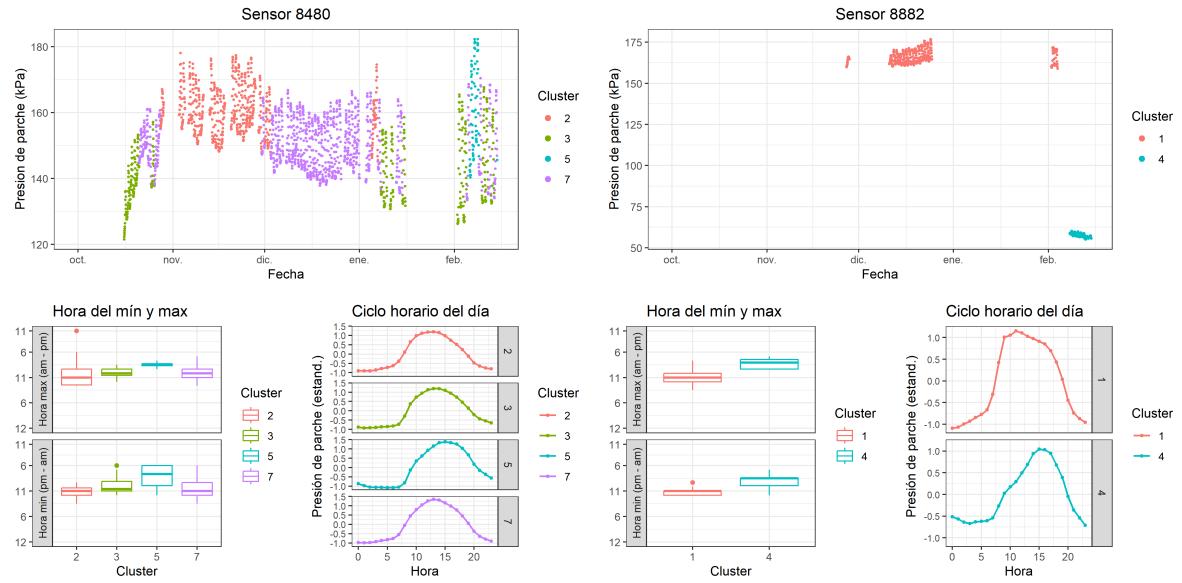




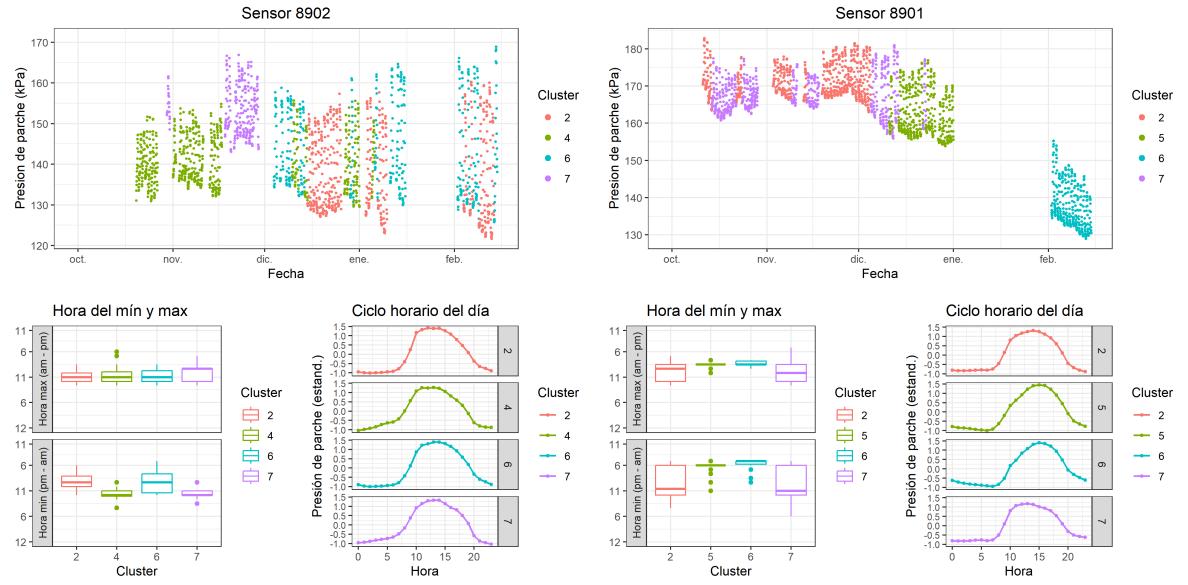
75 T4 (2023-2024)



Unidad 1



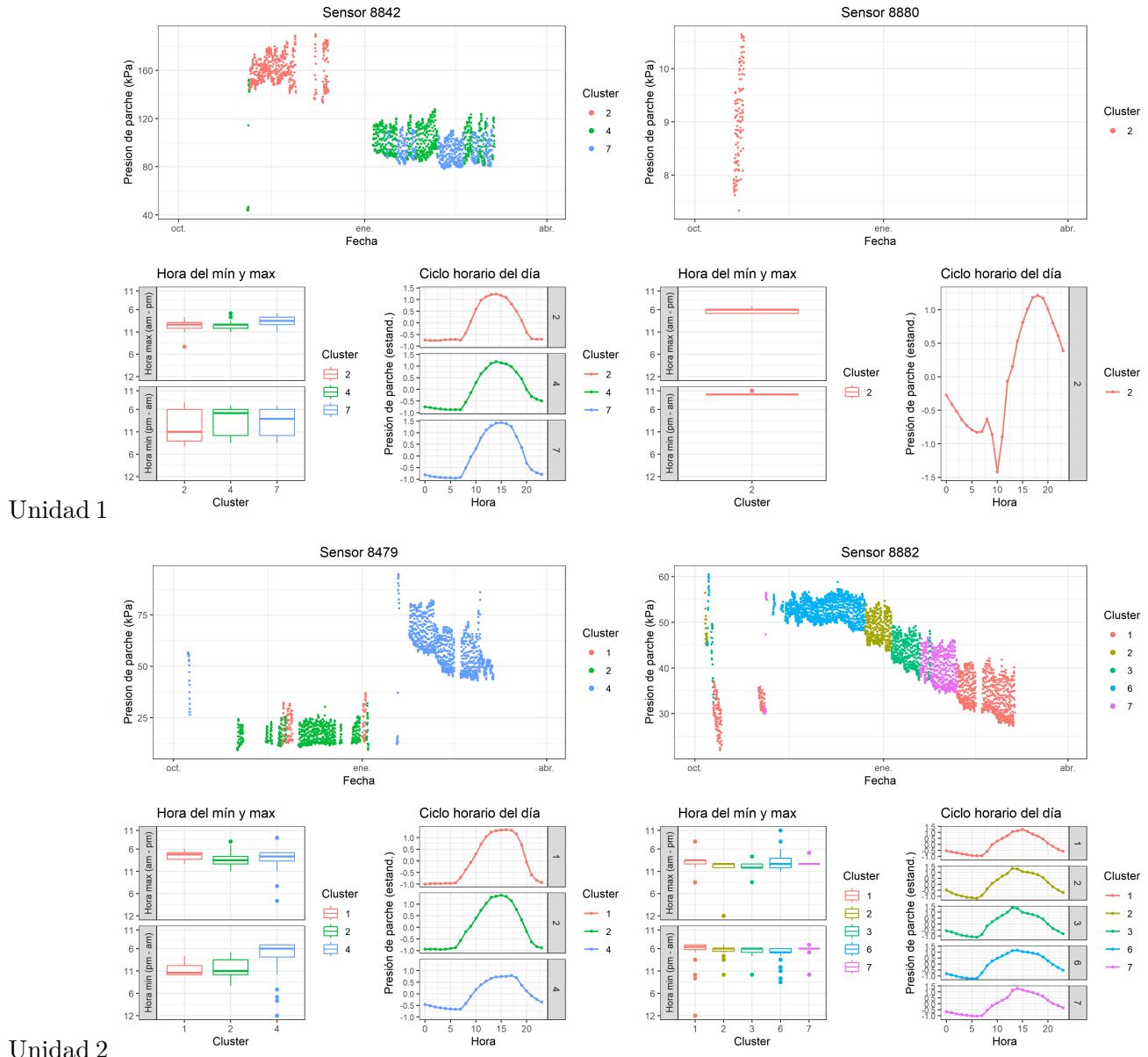
Unidad 2

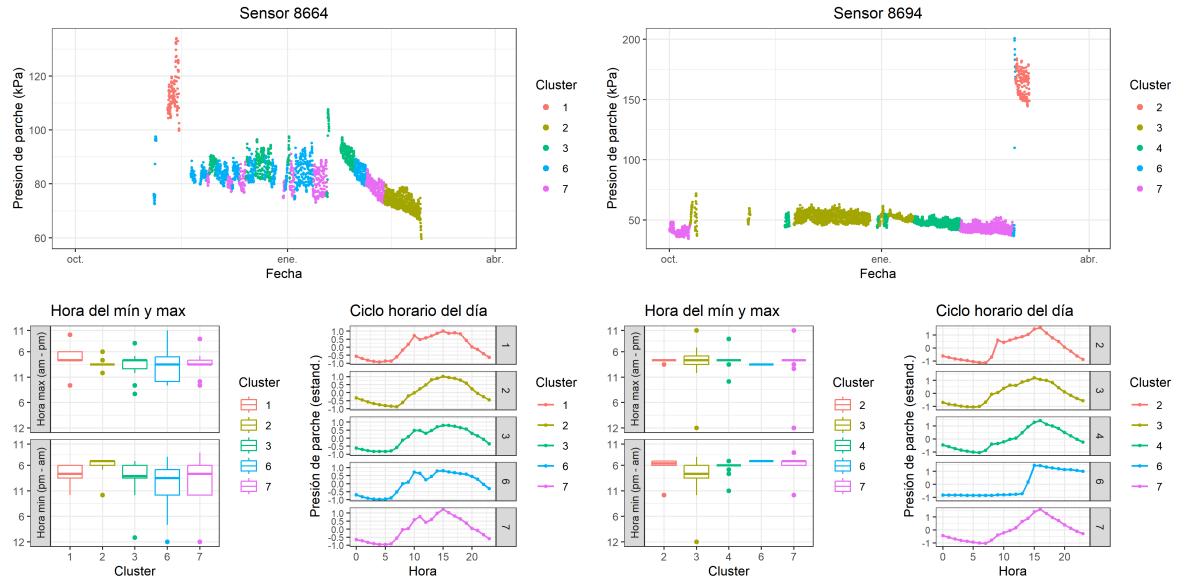


Unidad 3

75.1 Rio Claro

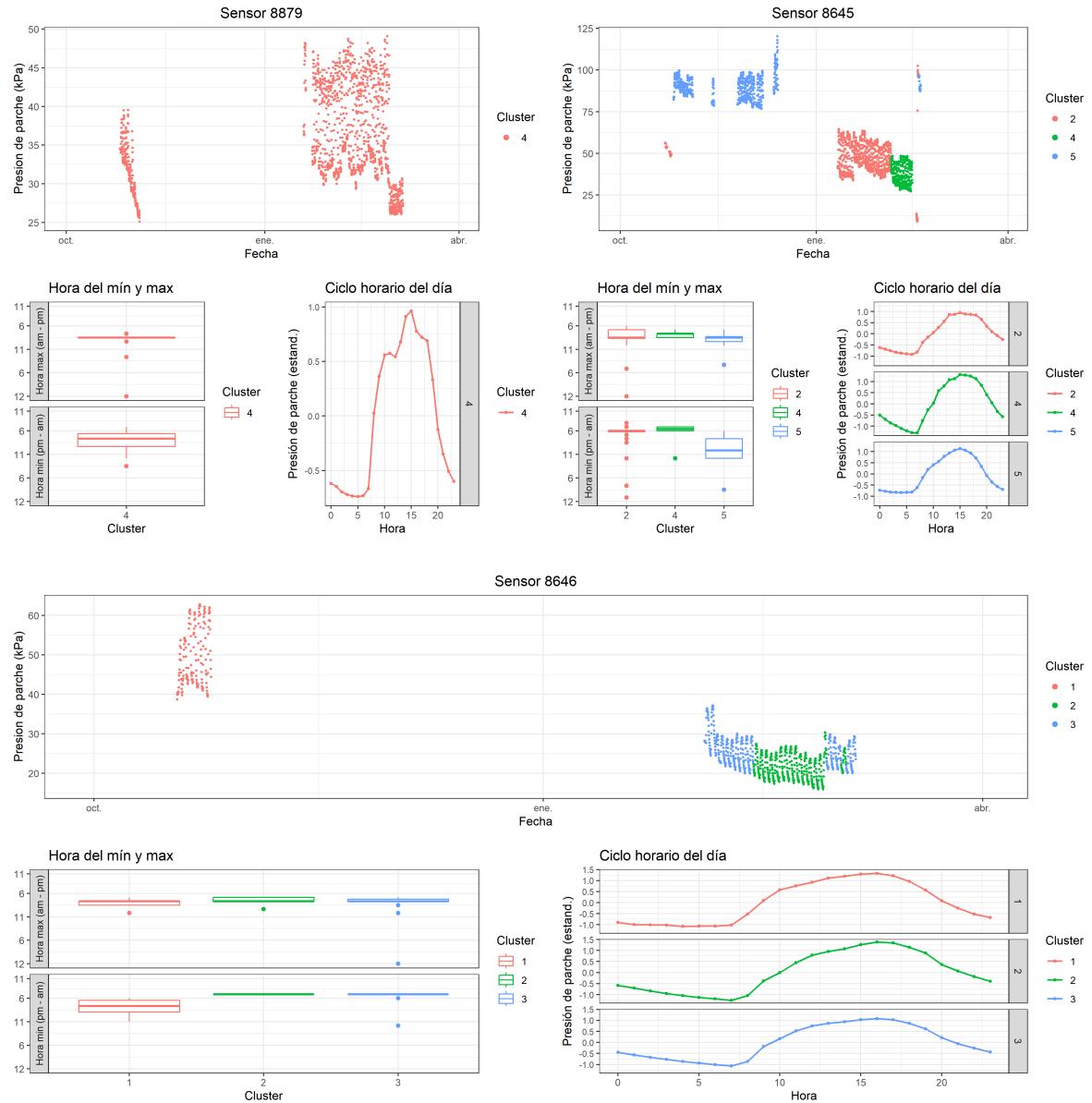
76 T1 (2022-2023)

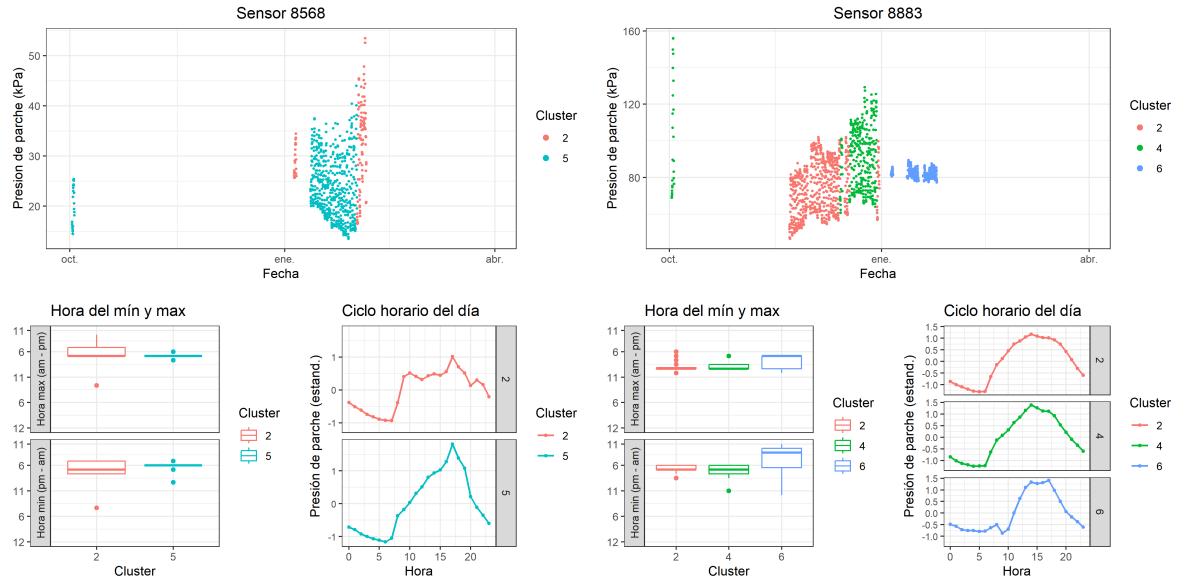




Unidad 3

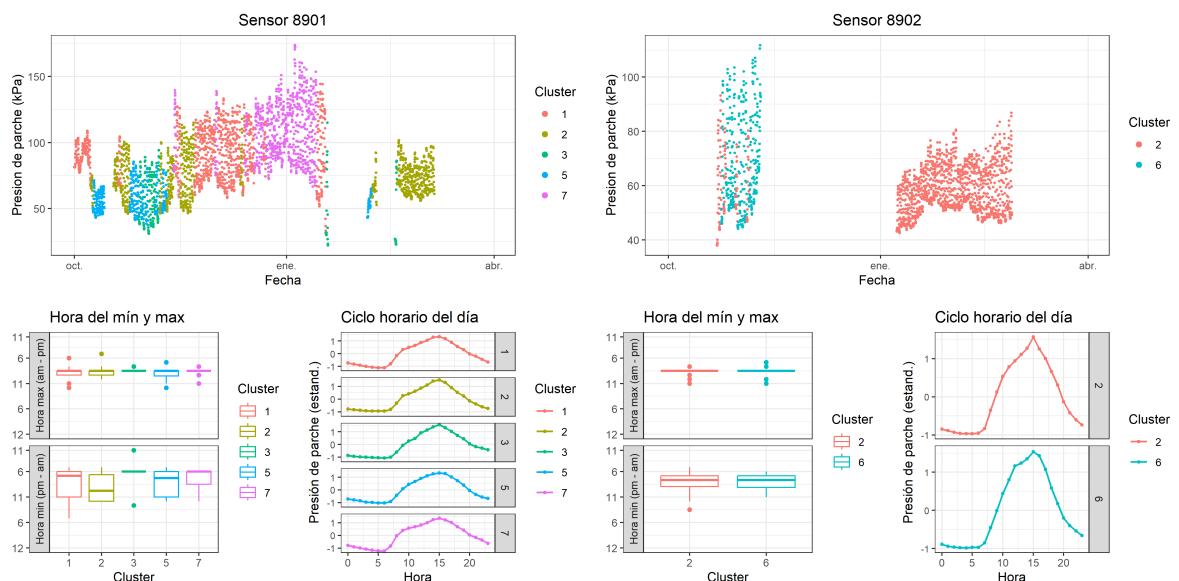
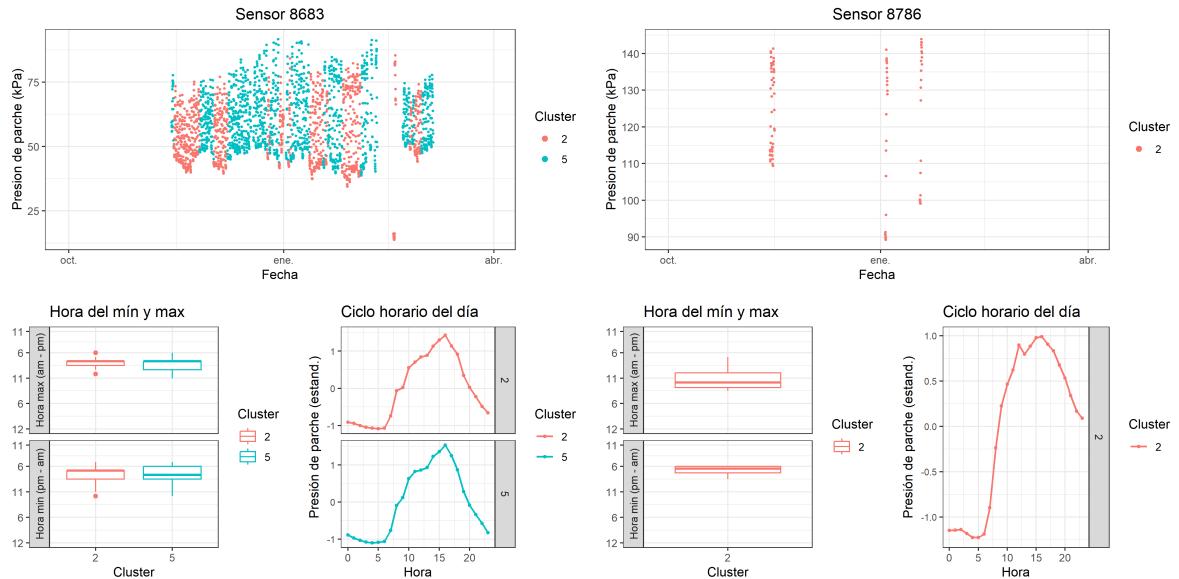
77 T2 (2022-2023)

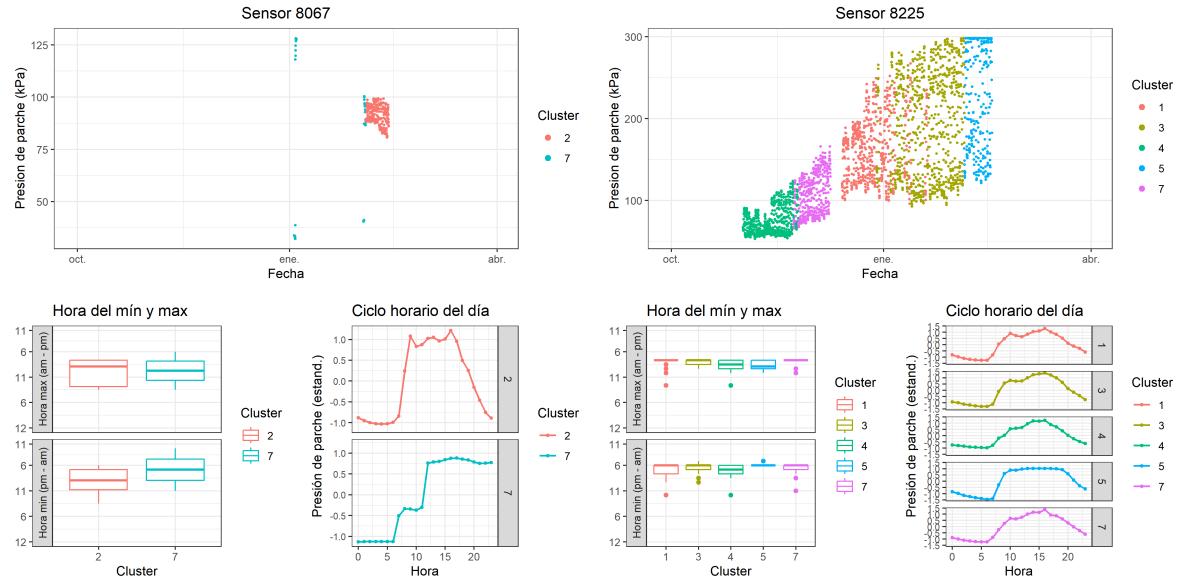




Unidad 3

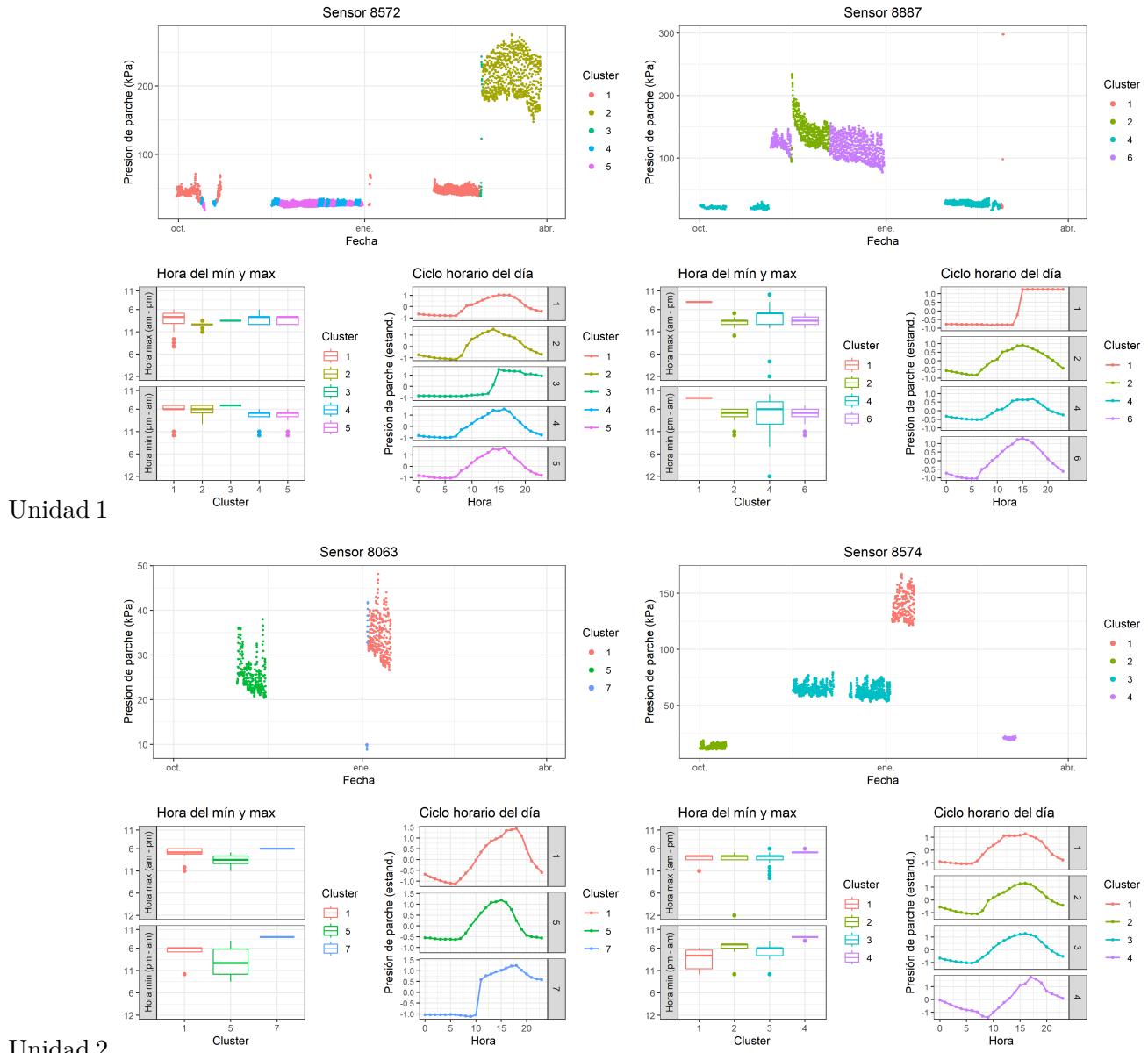
78 T3 (2022-2023)

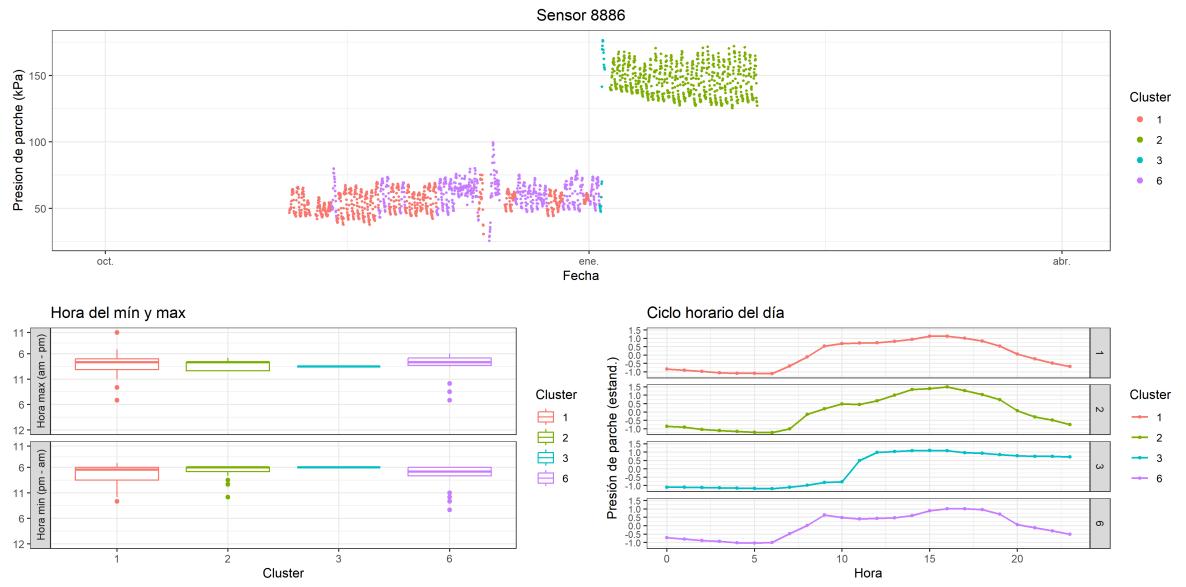




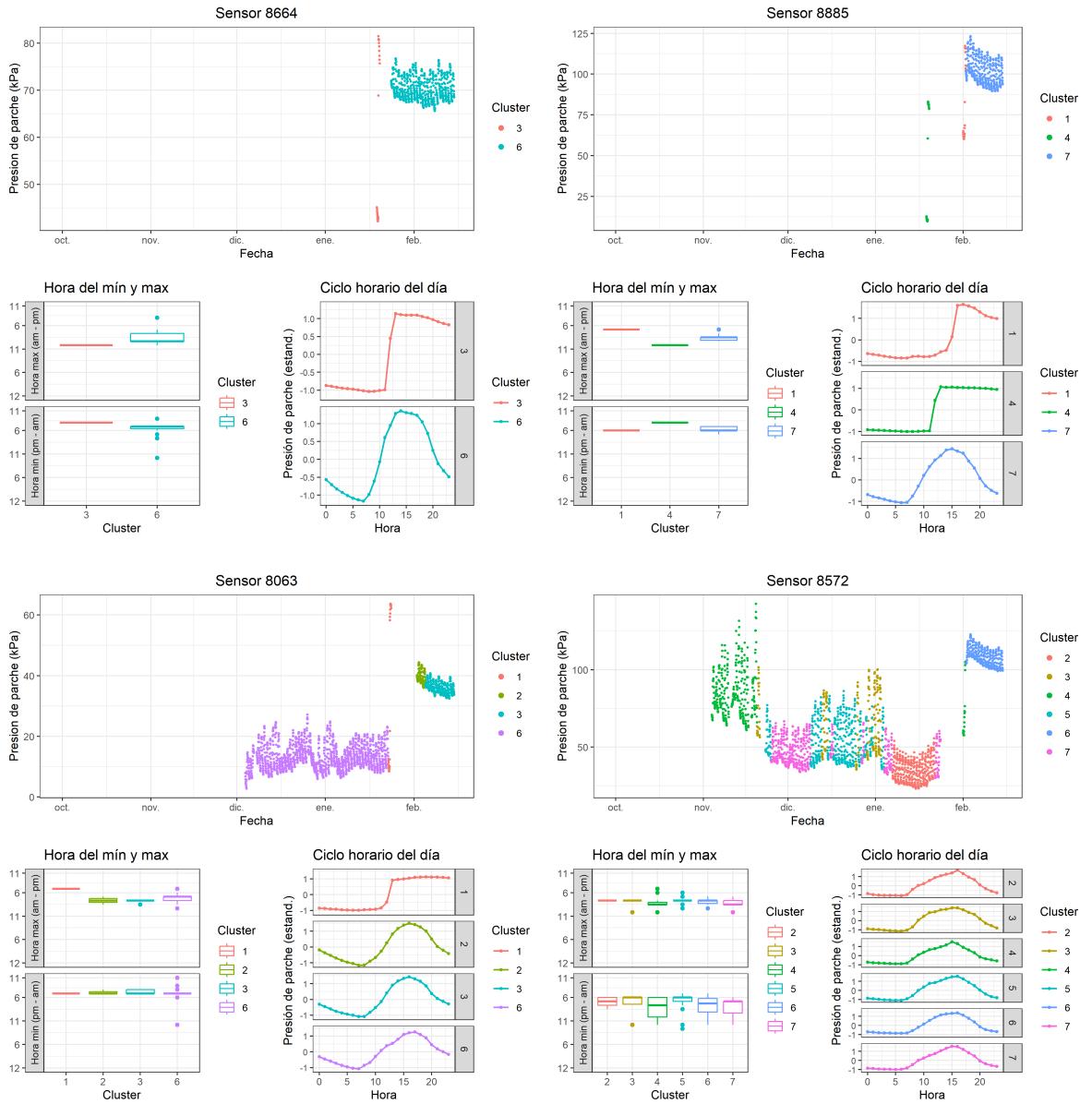
Unidad 3

79 T4 (2022-2023)

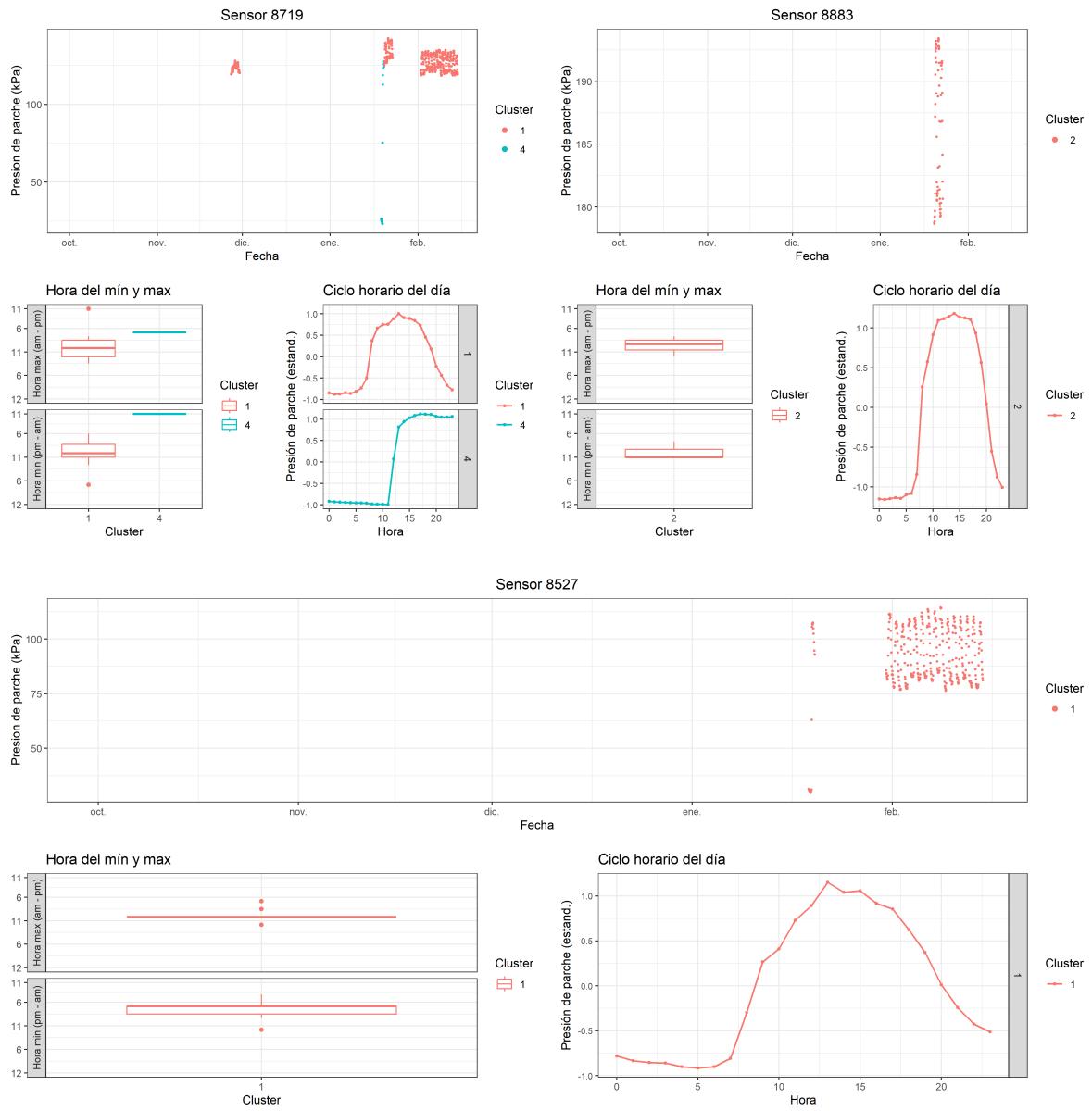


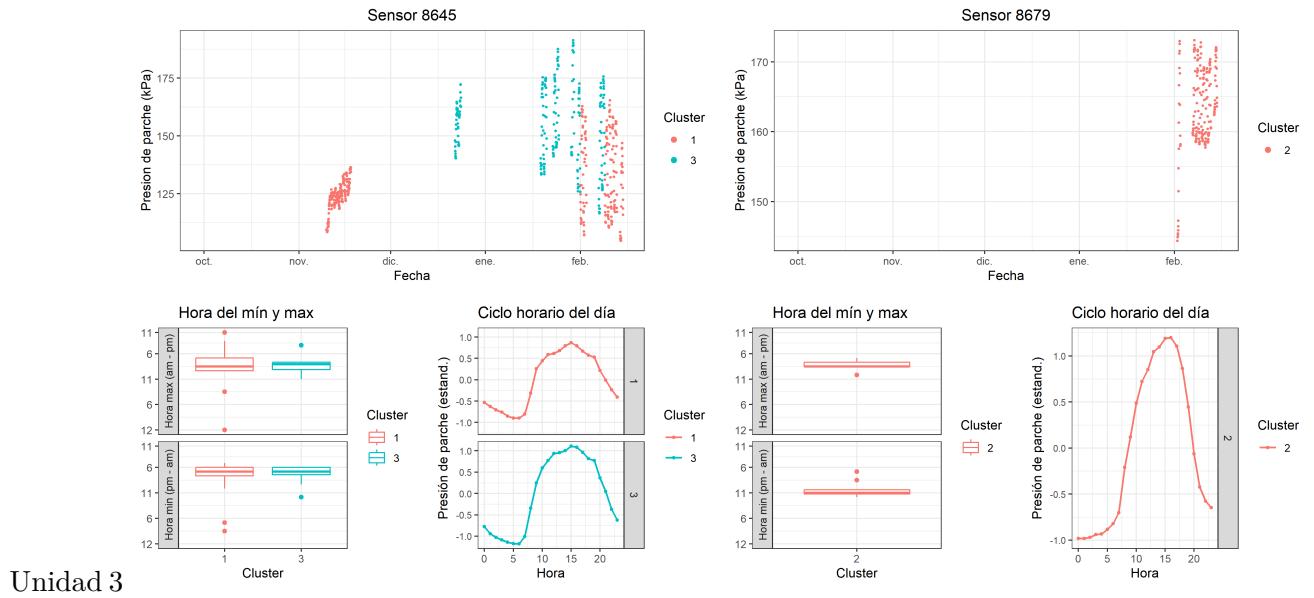


80 T1 (2023-2024)



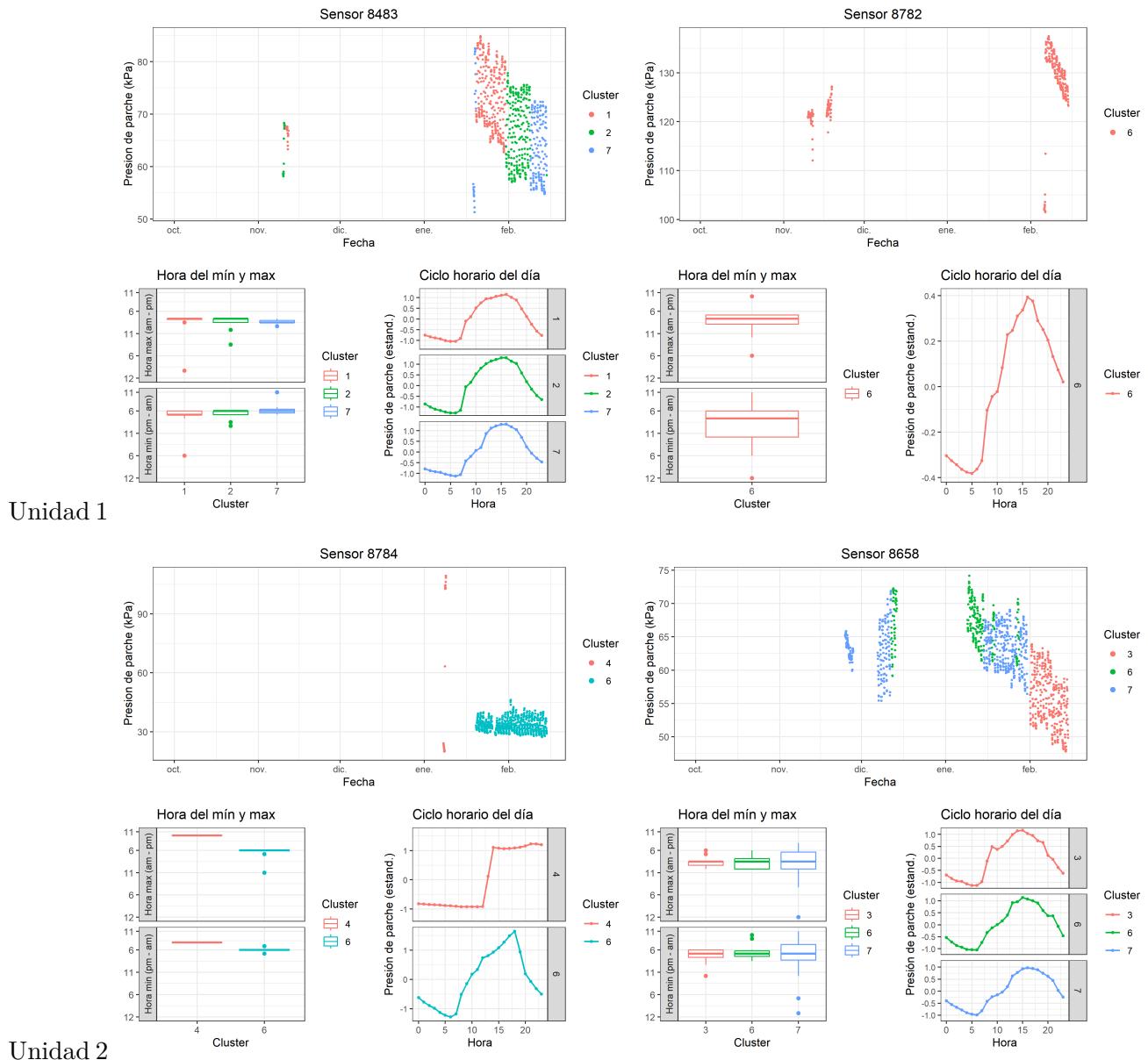
81 T2 (2023-2024)

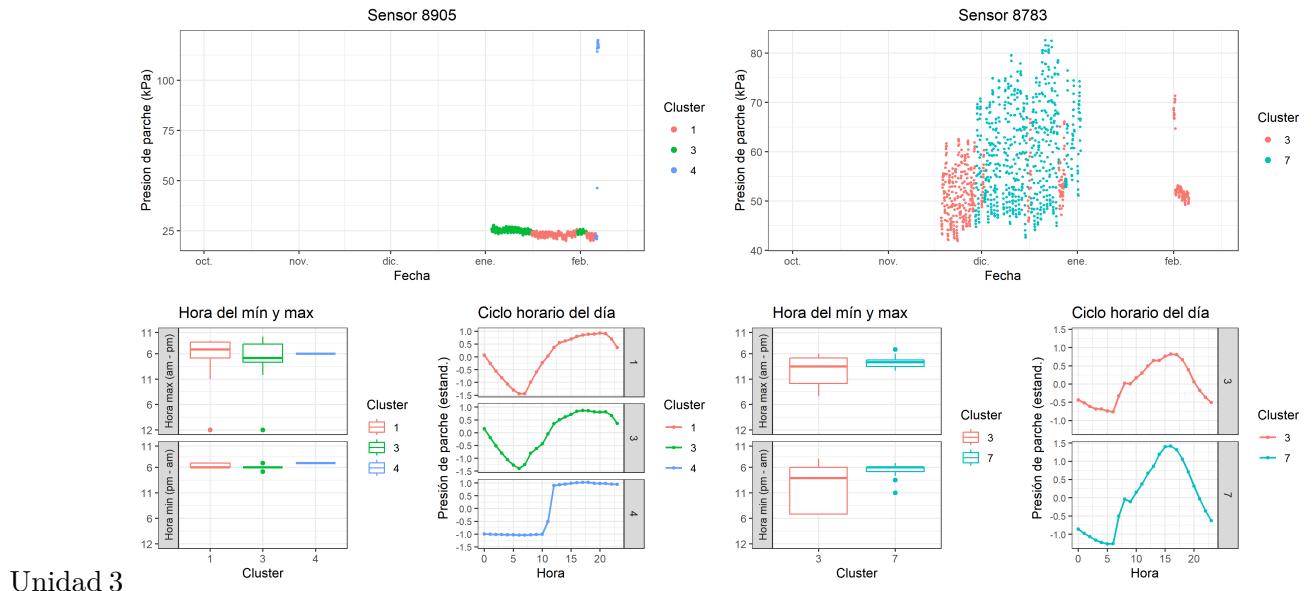




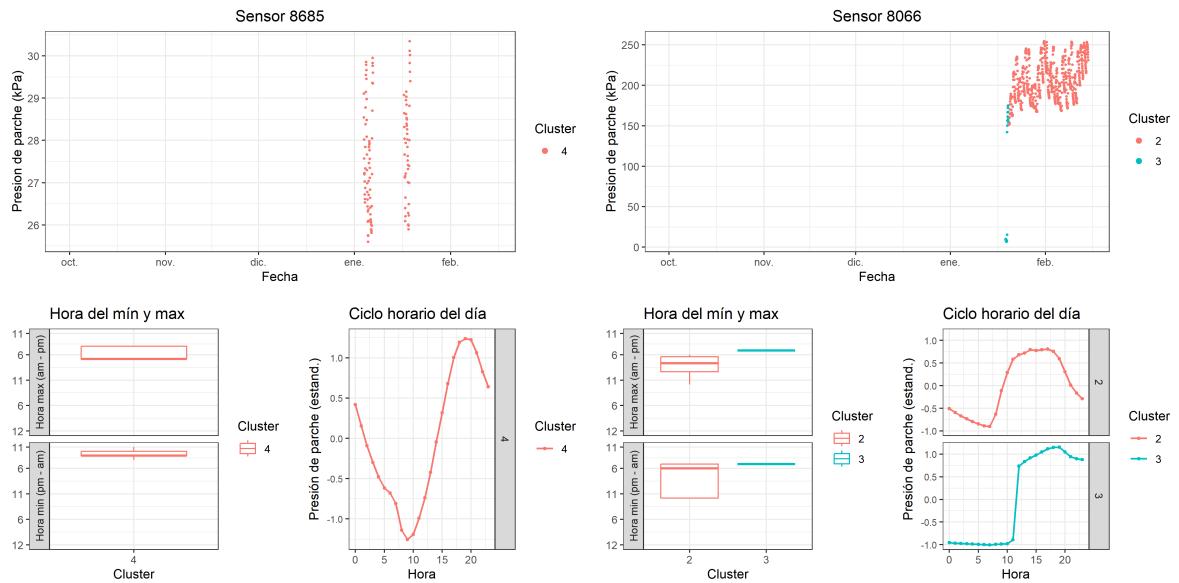
Unidad 3

82 T3 (2023-2024)

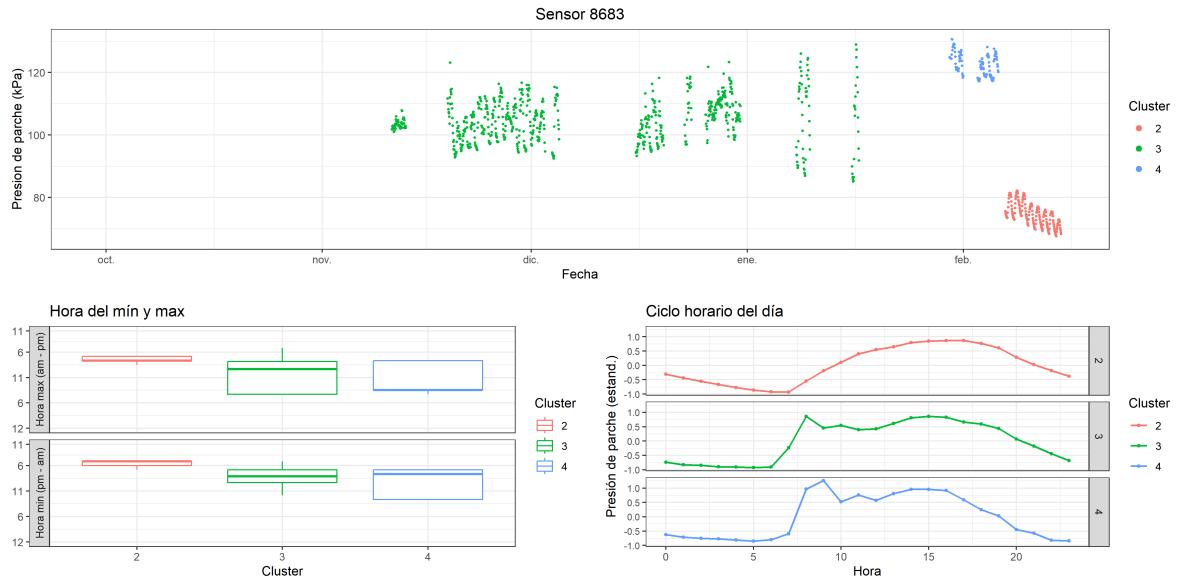




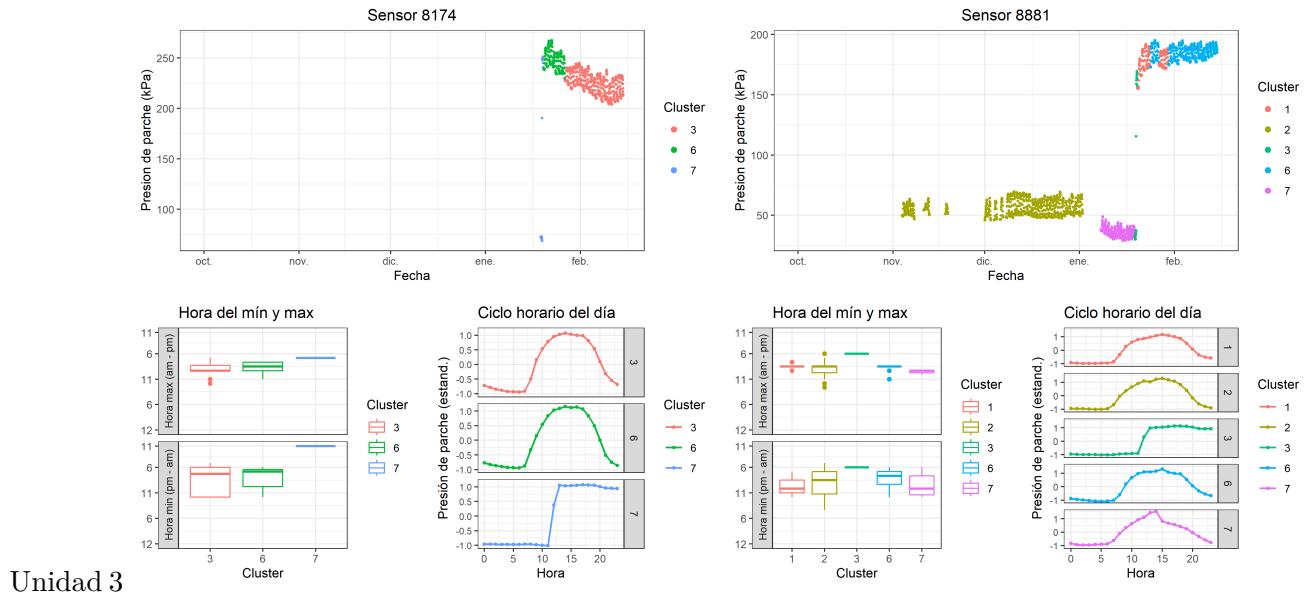
83 T4 (2023-2024)



Unidad 1



Unidad 2

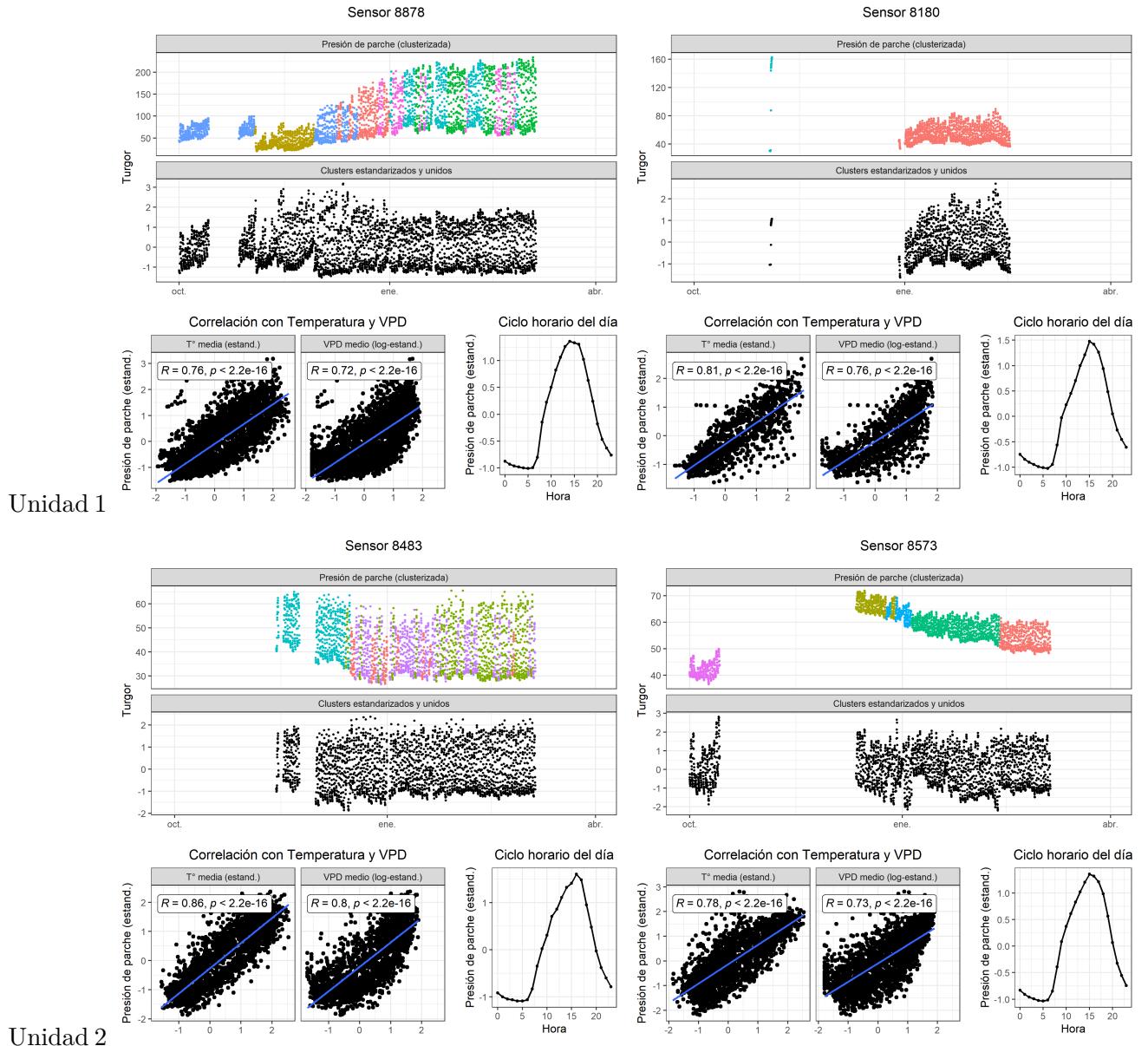


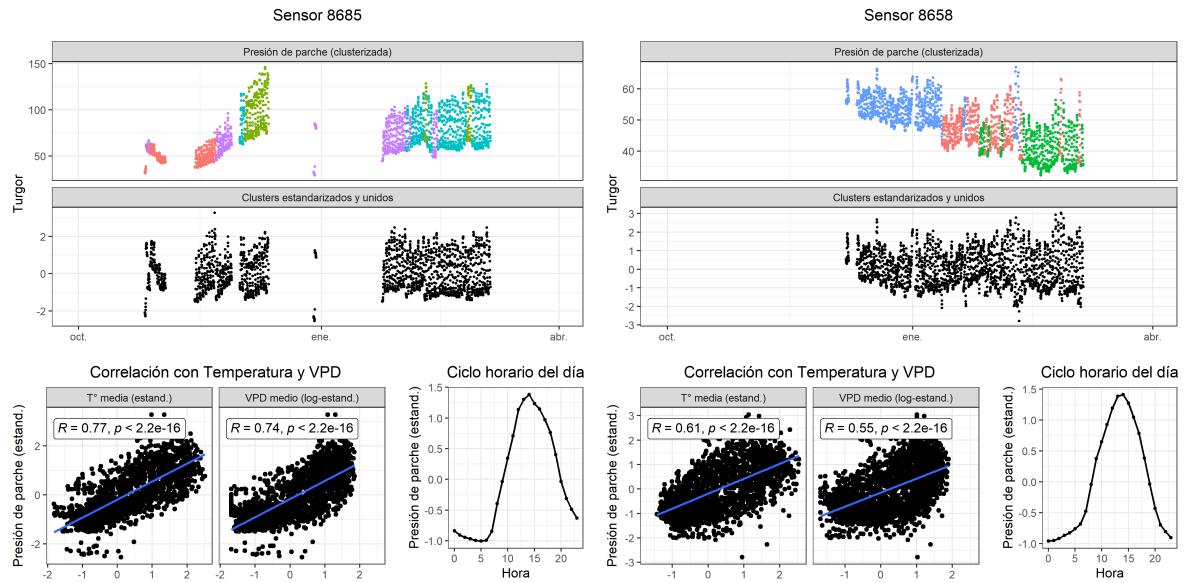
84 Estandarización de clusters

Para generar series únicas continuas por sensor (i.e. disminuir las discordancias entre periodos de recalibración de los sensores), se realizó una estandarización de cada cluster, lo cual significó una unificación las series temporales de estos a nivel de sensor. A continuación se muestran dichas series resultantes, además de su correlación con temperatura y VPD, y el ciclo horario del día.

84.1 La Esperanza

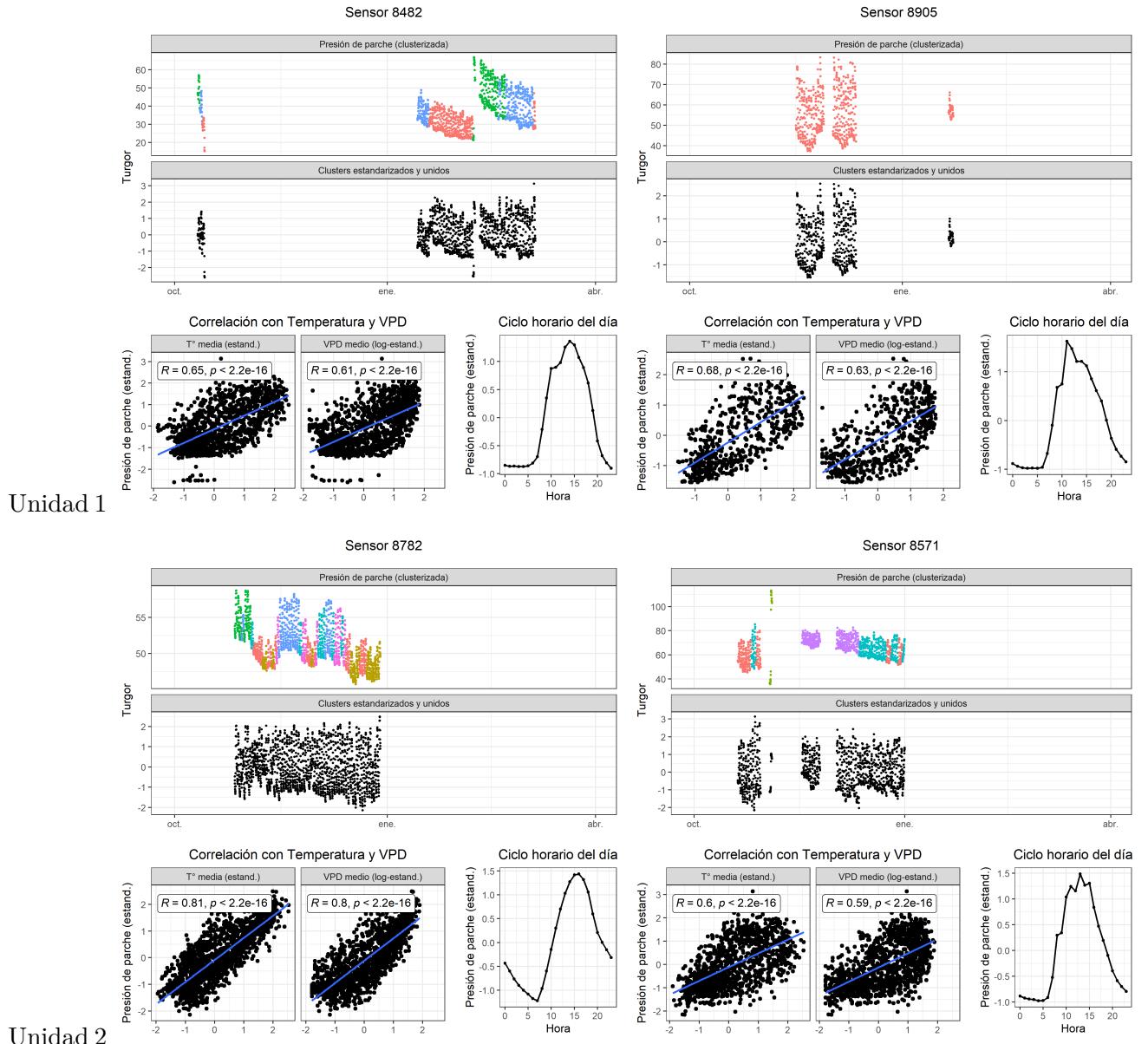
85 T1 (2022-2023)



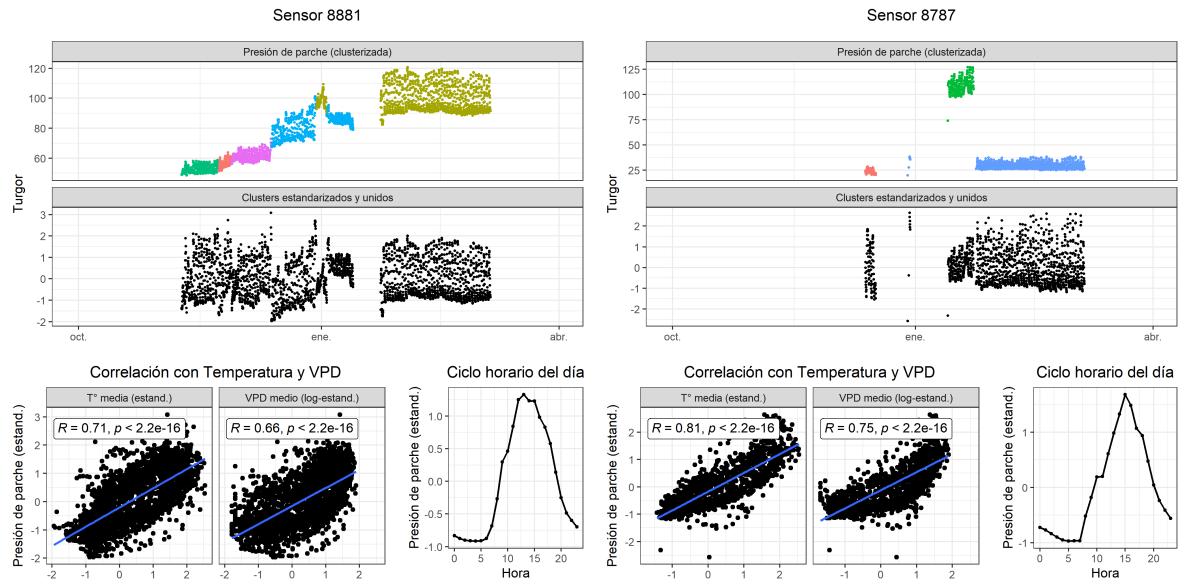


Unidad 3

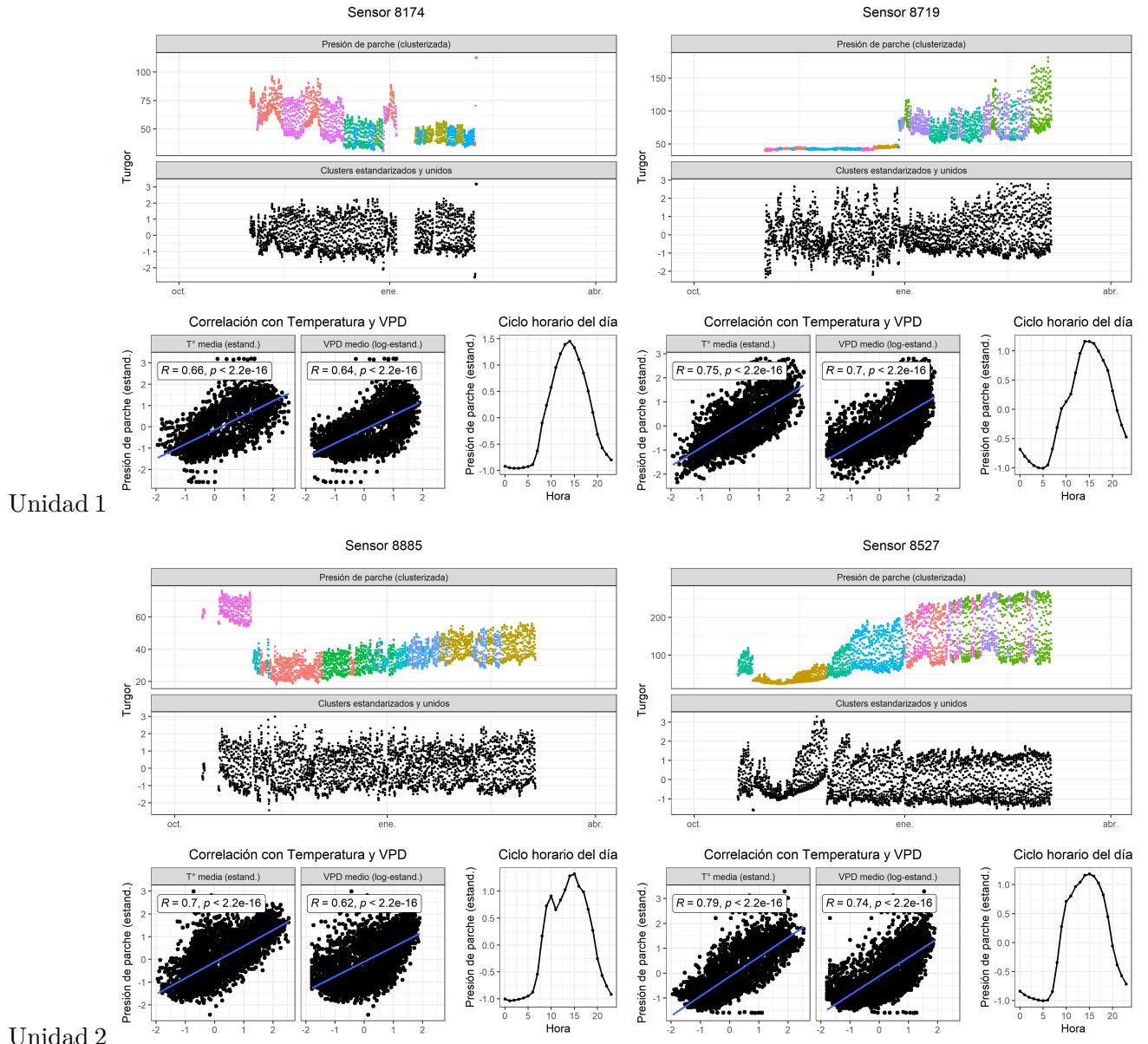
86 T2 (2022-2023)

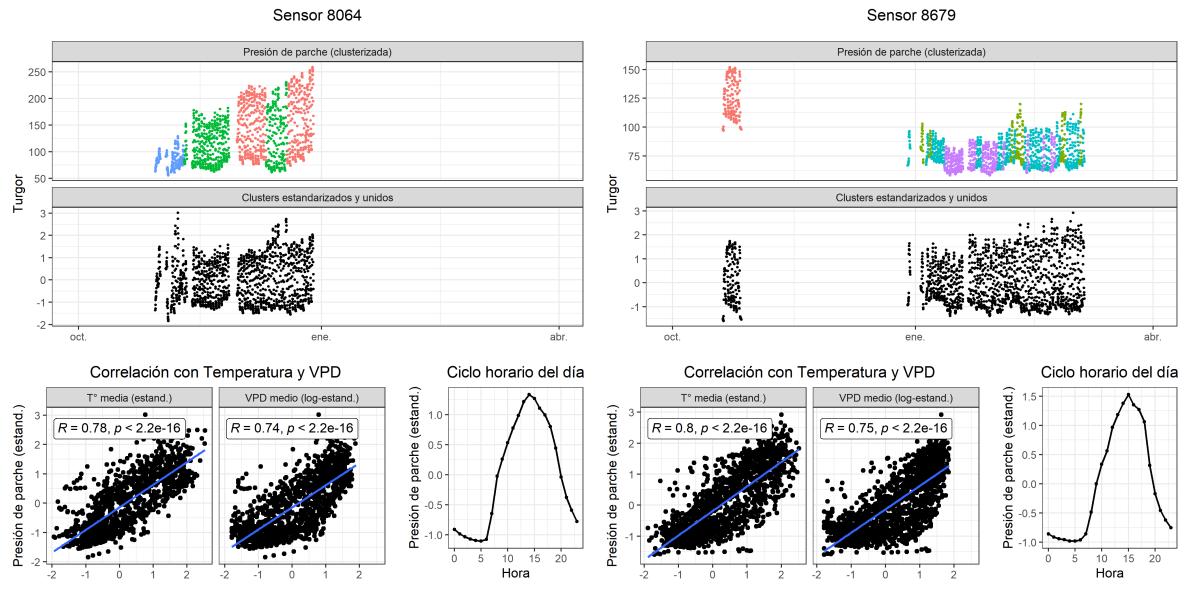


Unidad 3



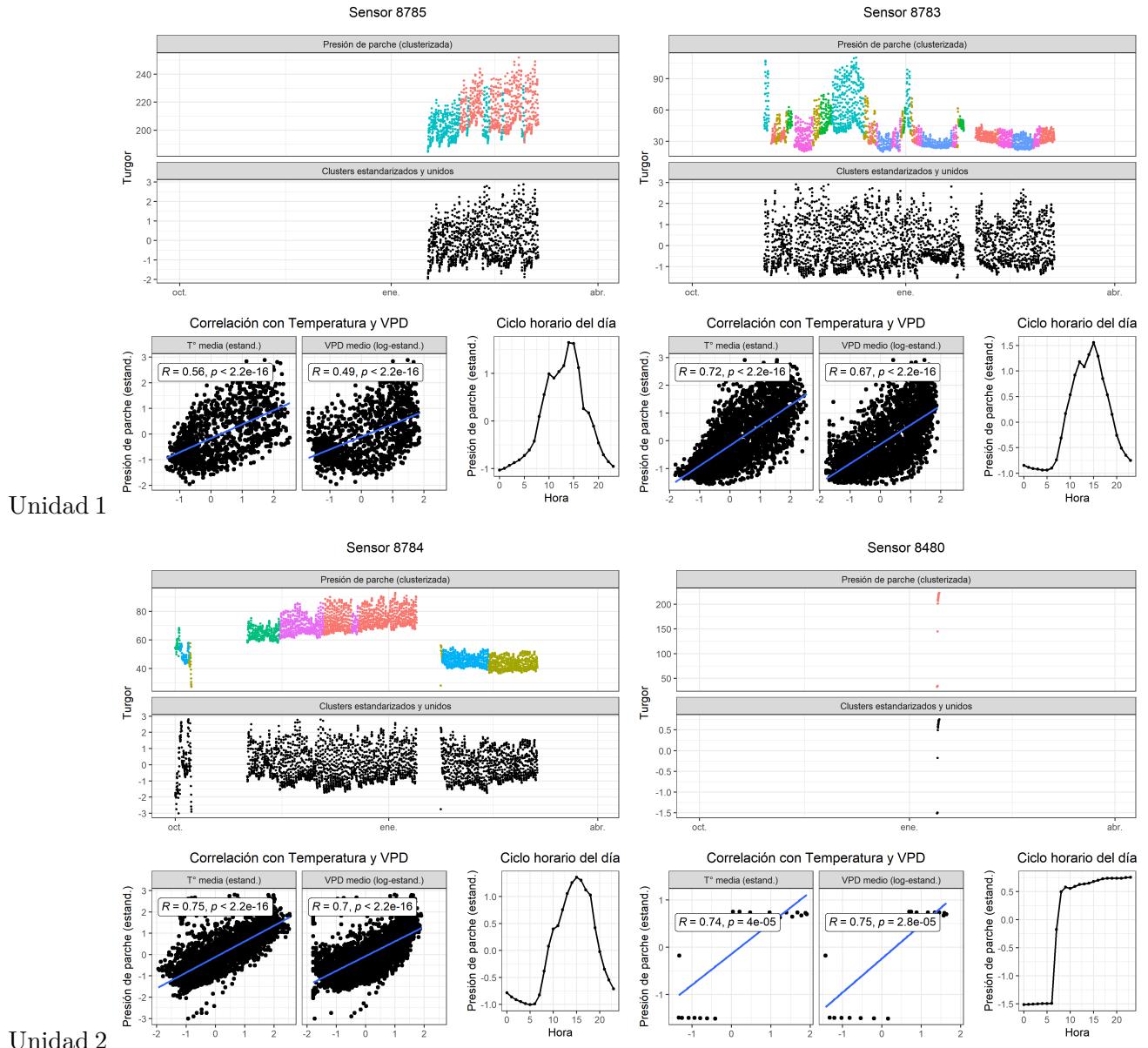
87 T3 (2022-2023)

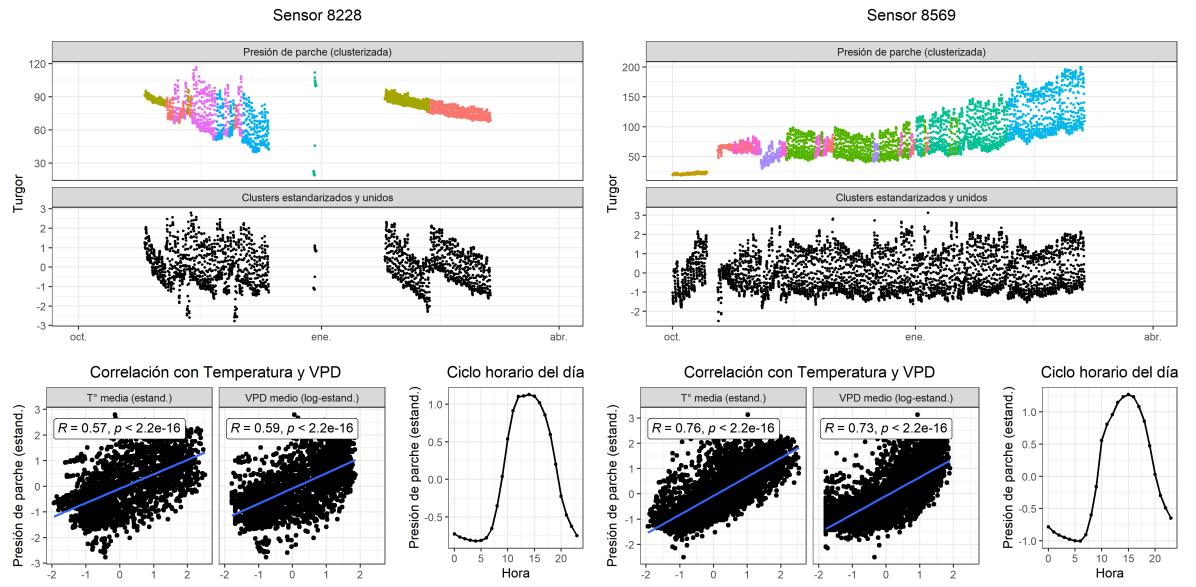




Unidad 3

88 T4 (2022-2023)

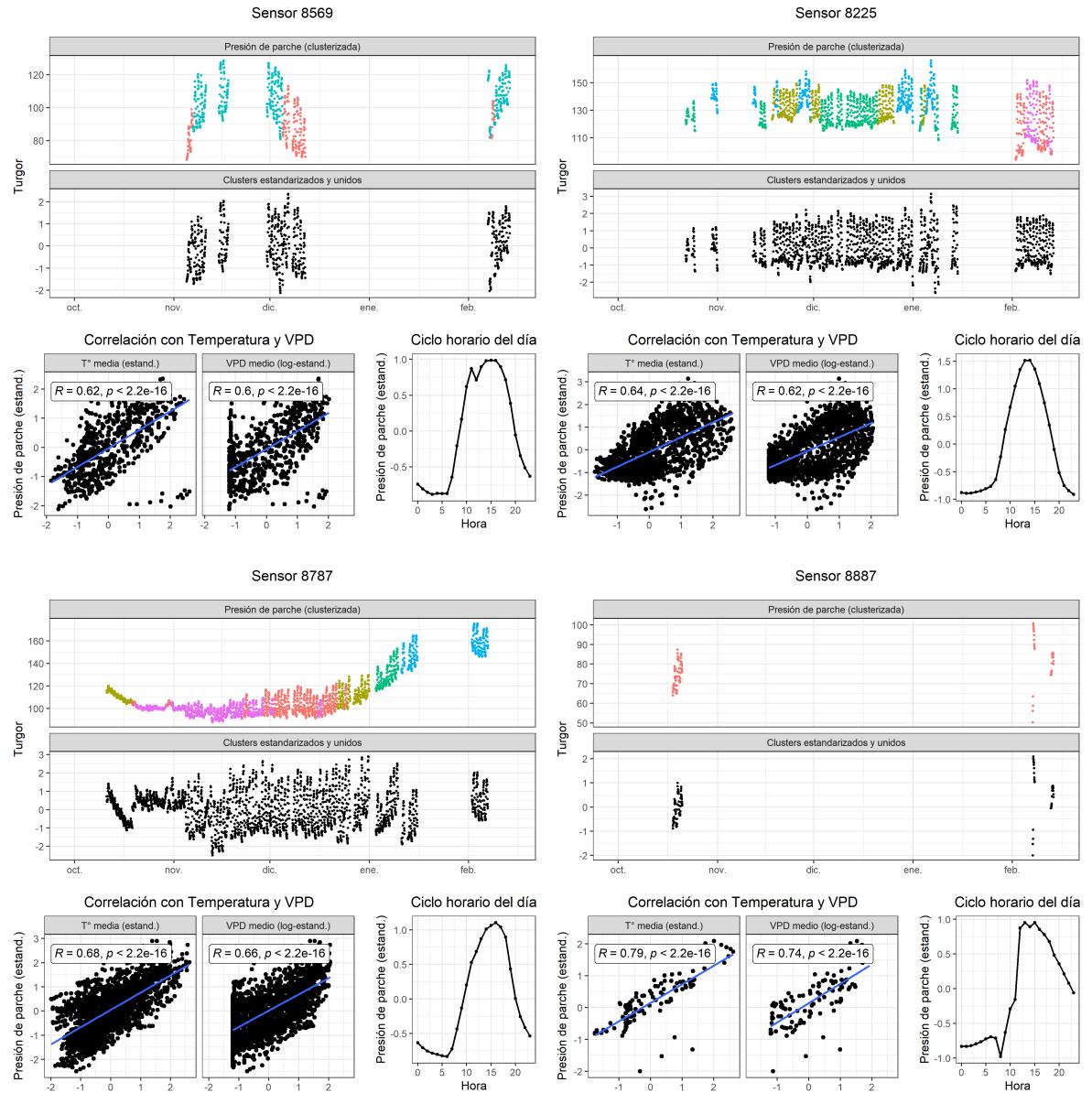




Unidad 3

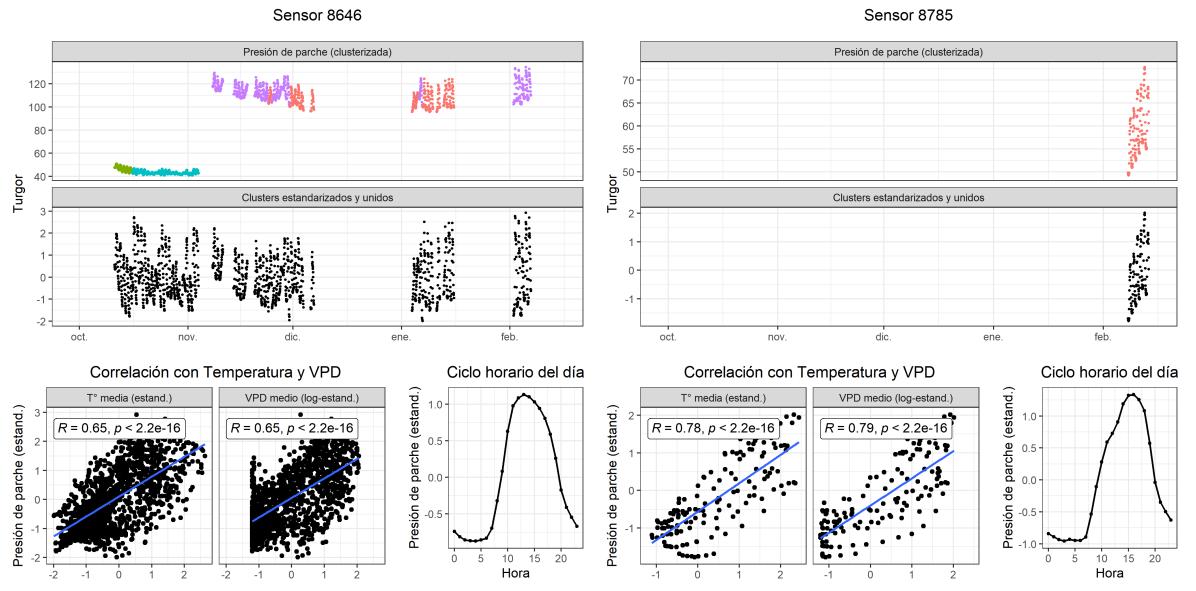
89 T1 (2023-2024)

Unidad 1

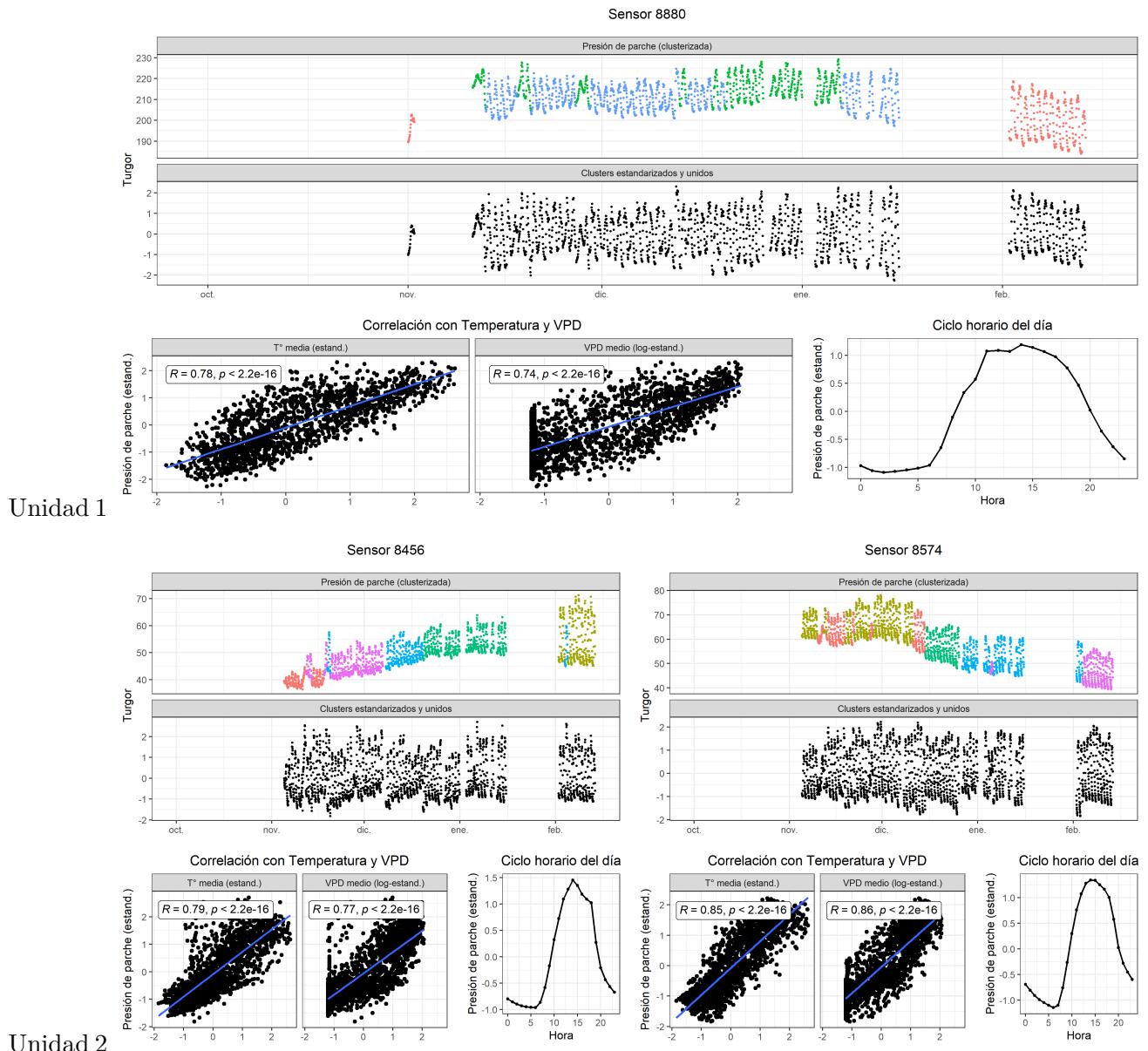


Unidad 2

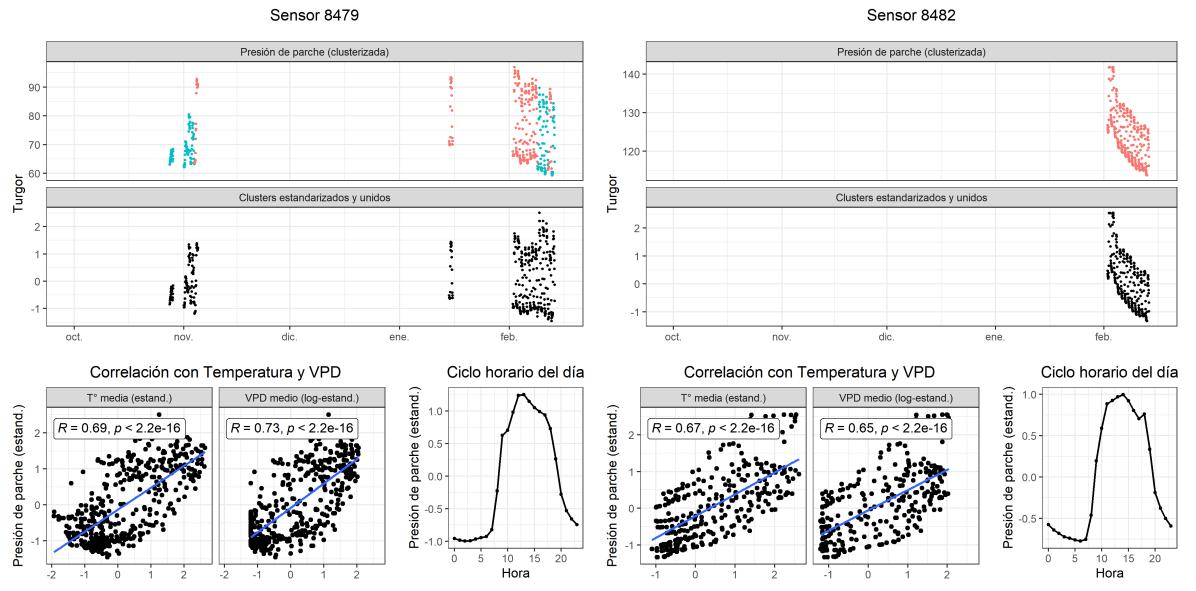
Unidad 3



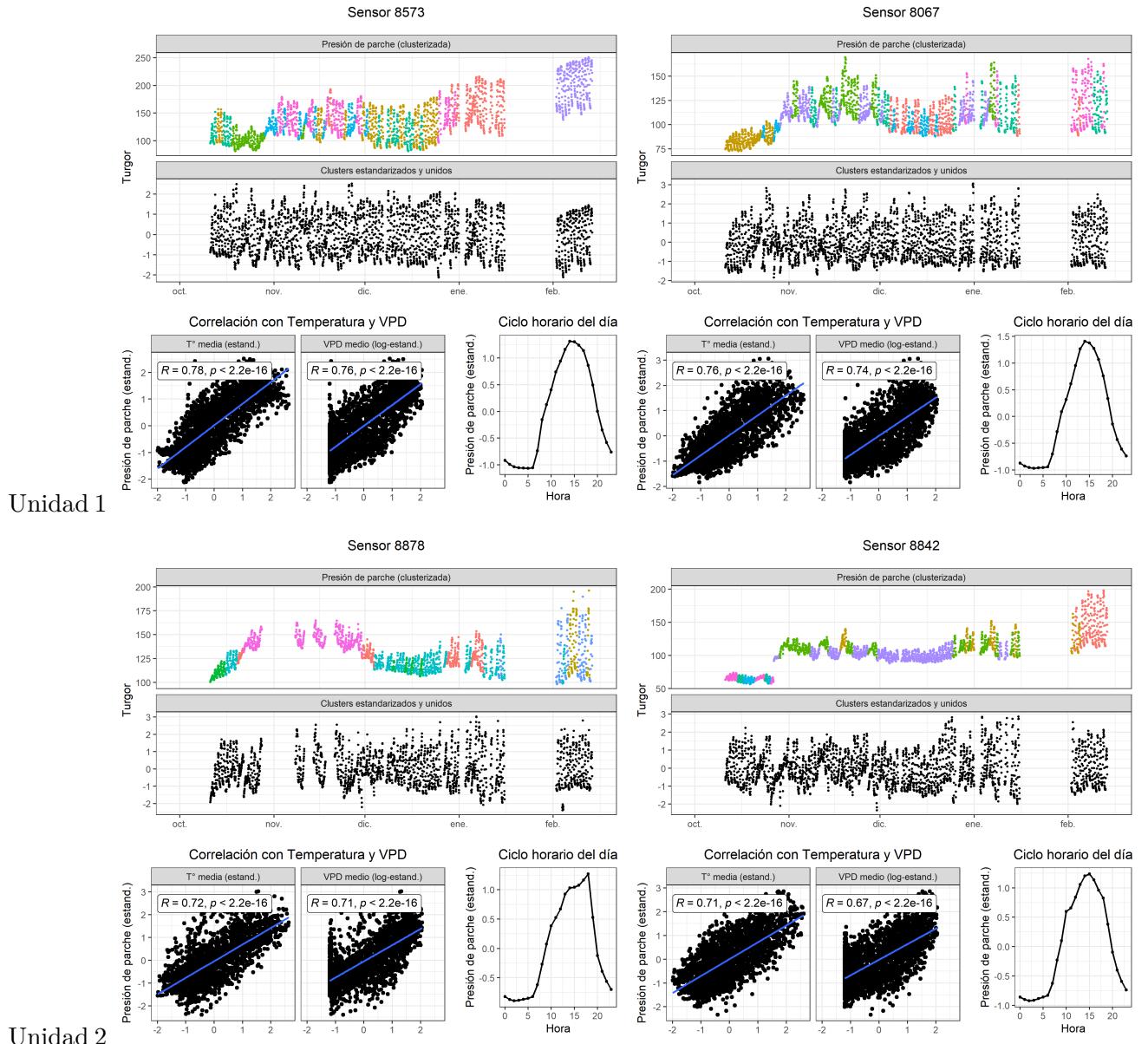
90 T2 (2023-2024)



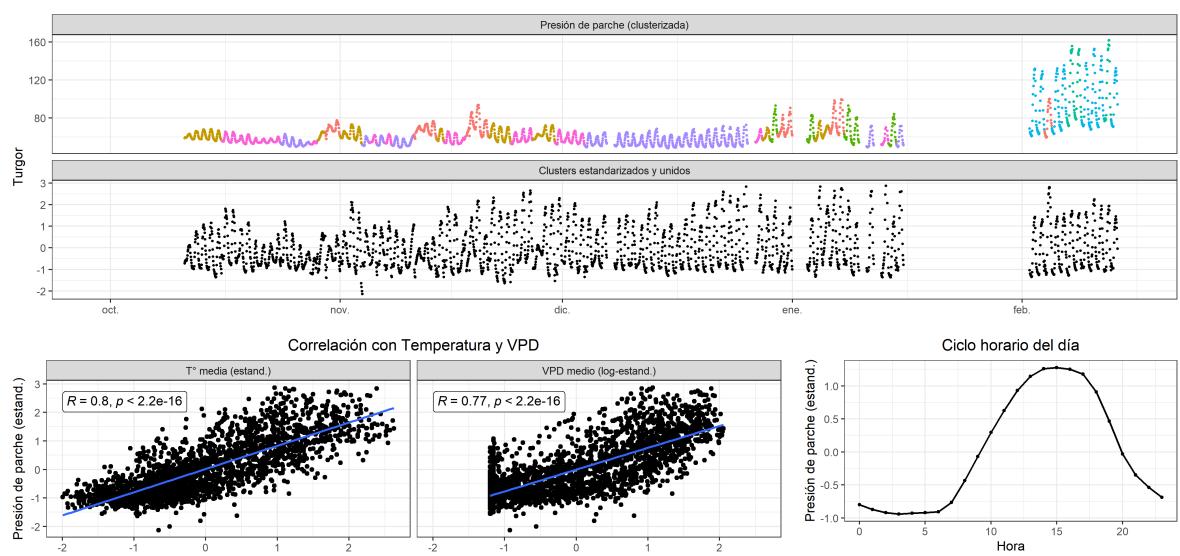
Unidad 3



91 T3 (2023-2024)



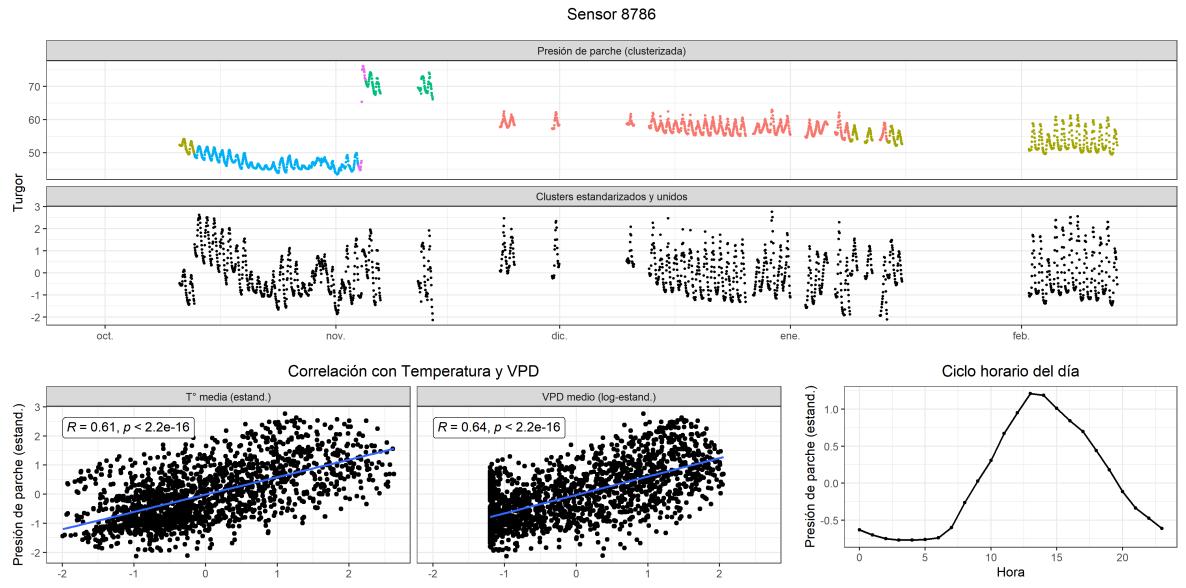
Sensor 8694



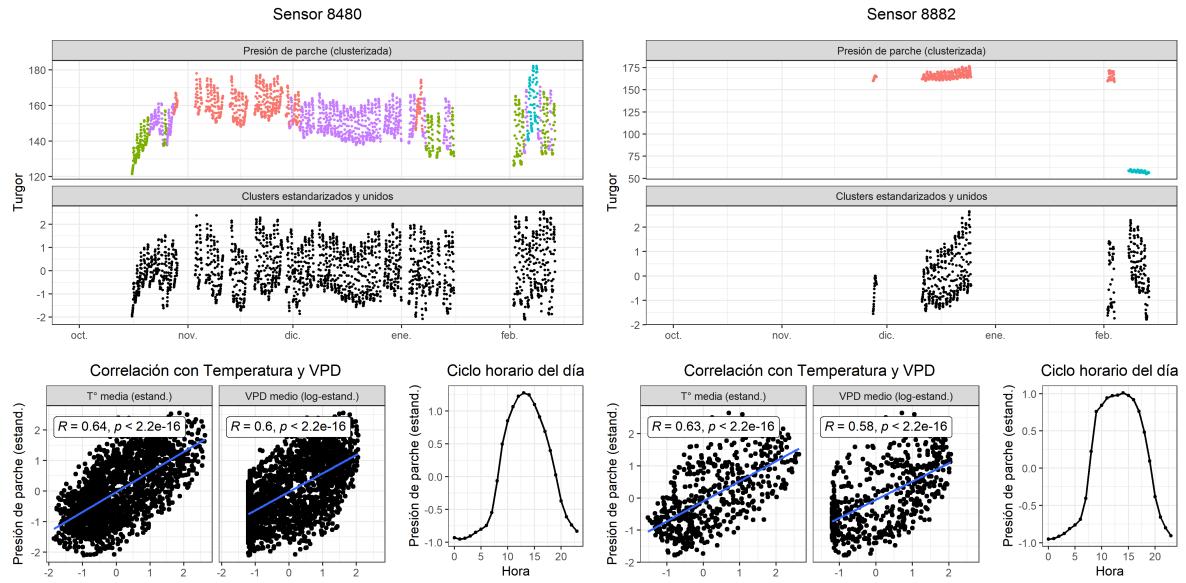
Unidad 3

92 T4 (2023-2024)

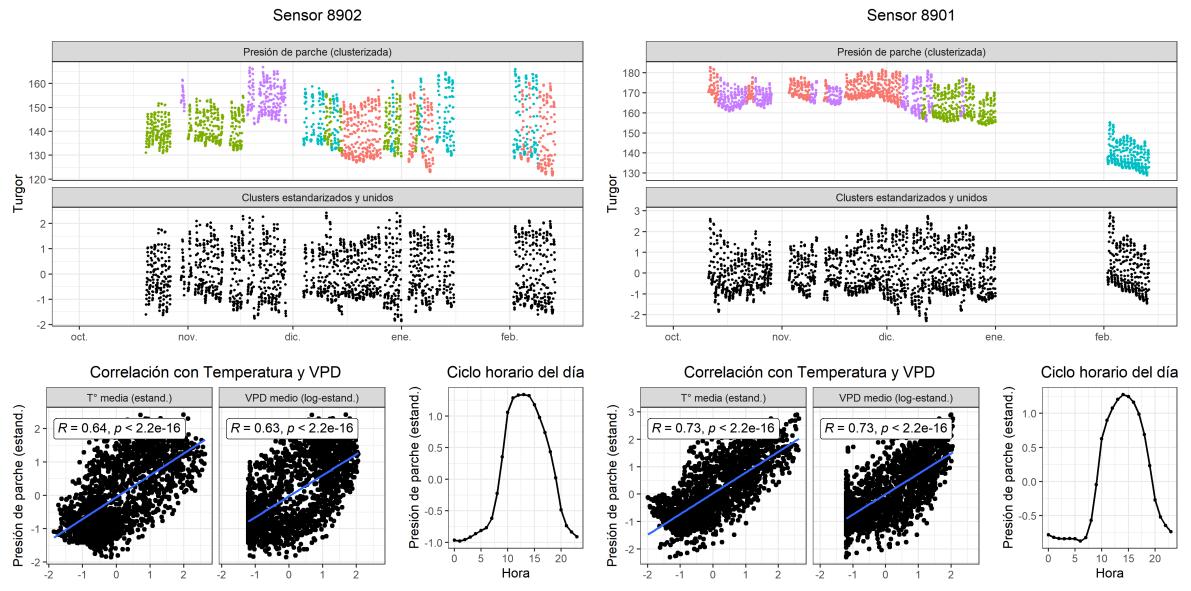
Unidad 1



Unidad 2



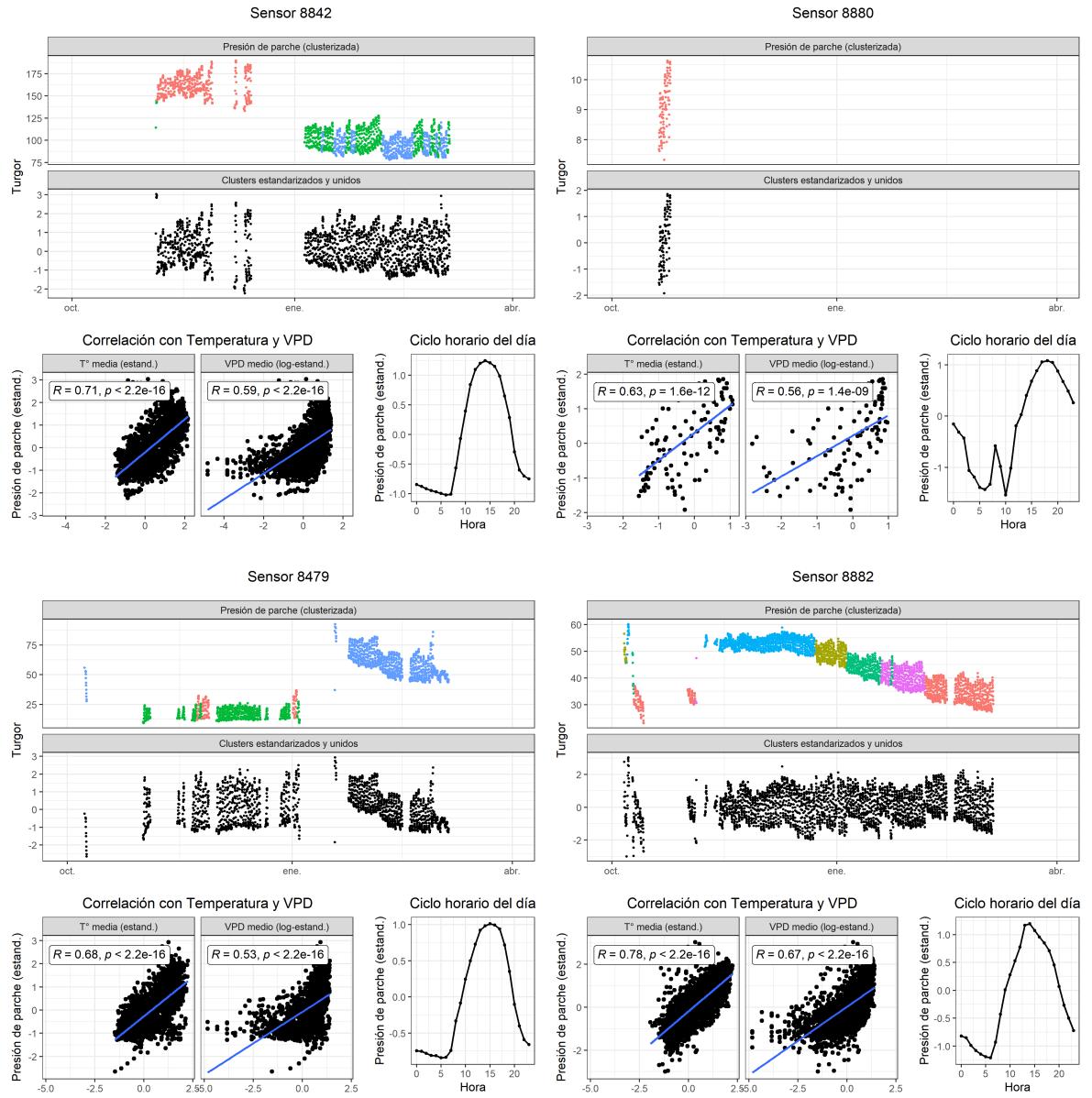
Unidad 3



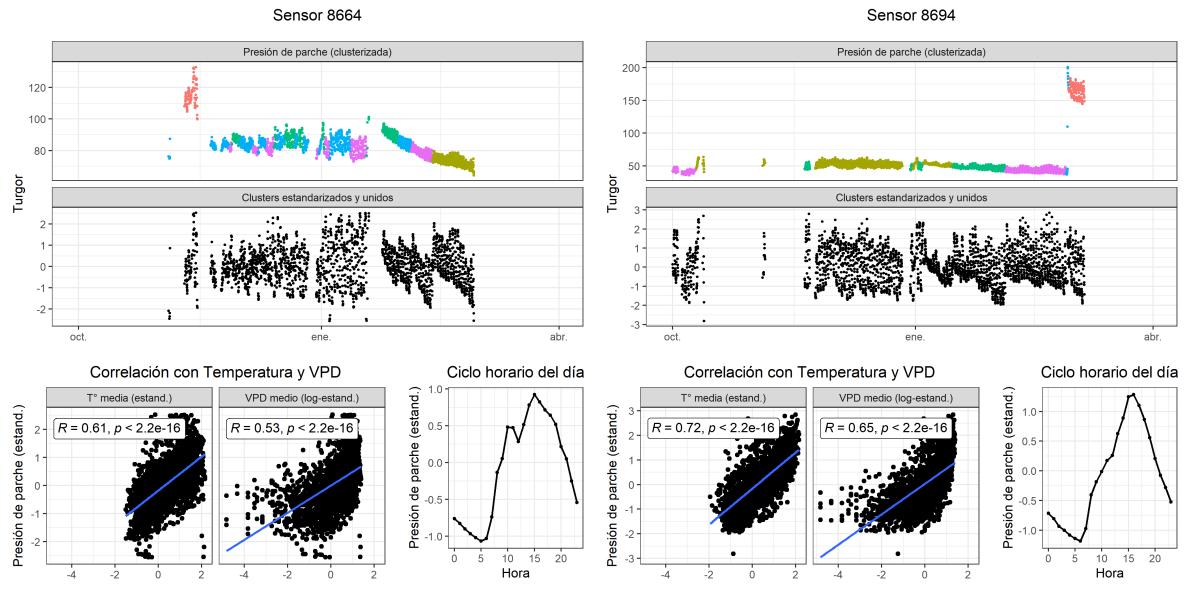
92.1 Rio Claro

93 T1 (2022-2023)

Unidad 1

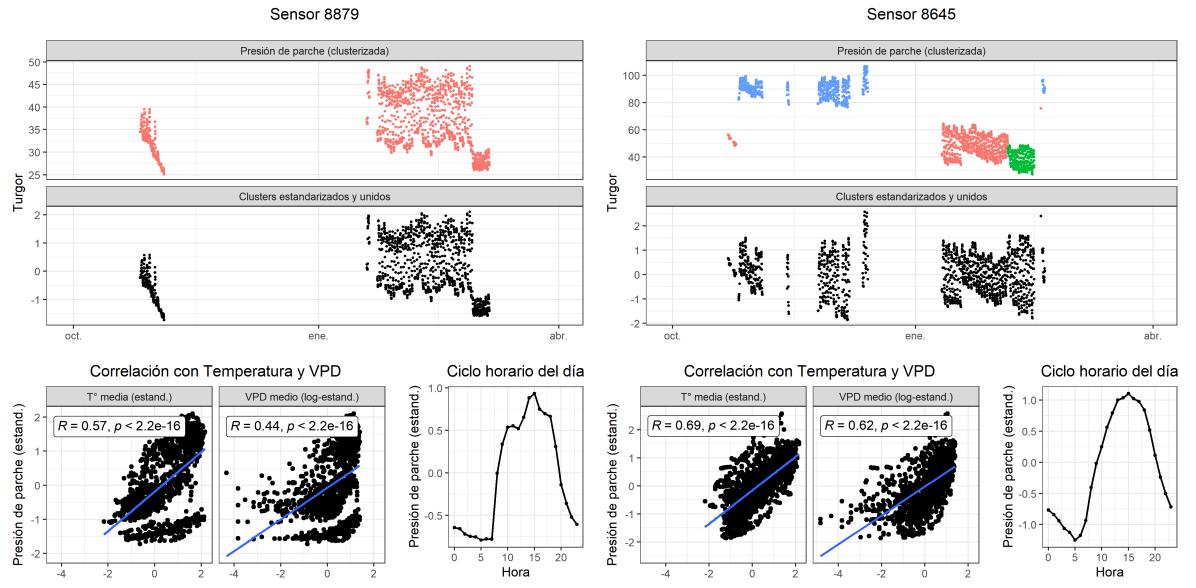


Unidad 3



94 T2 (2022-2023)

Unidad 1



Correlación con Temperatura y VPD

T° media (estand.)

VPD medio (log-estand.)

Ciclo horario del día

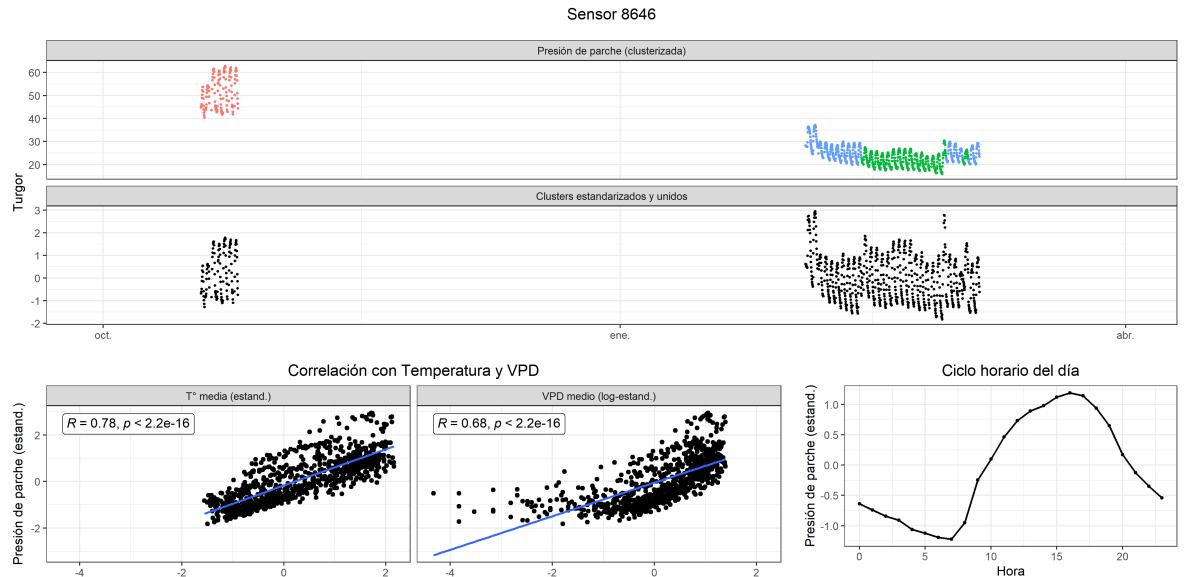
Correlación con Temperatura y VPD

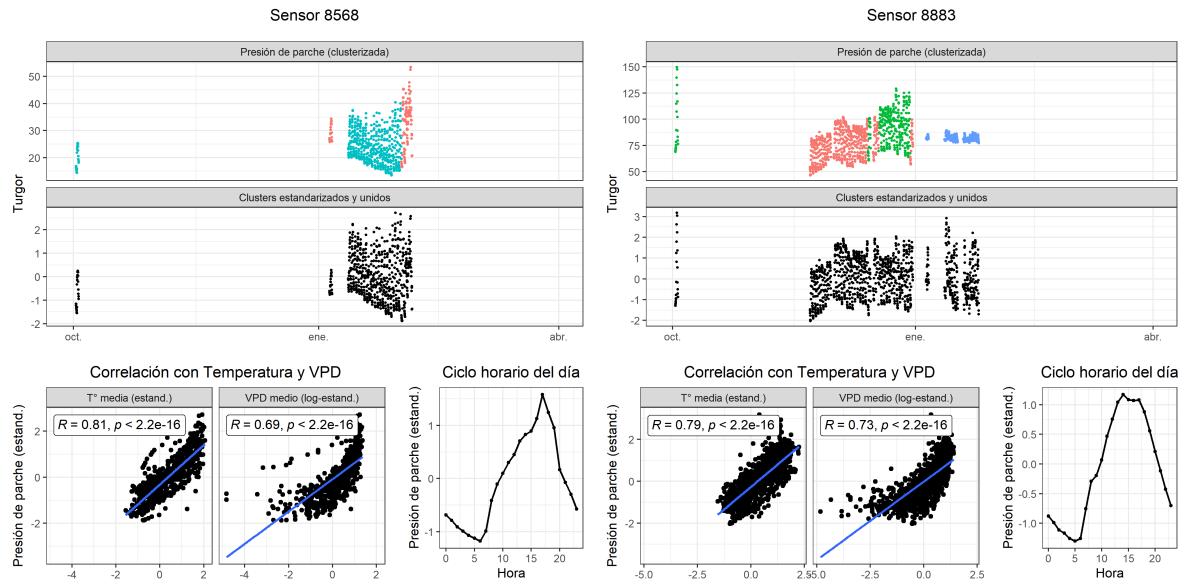
T° media (estand.)

VPD medio (log-estand.)

Ciclo horario del día

Unidad 2

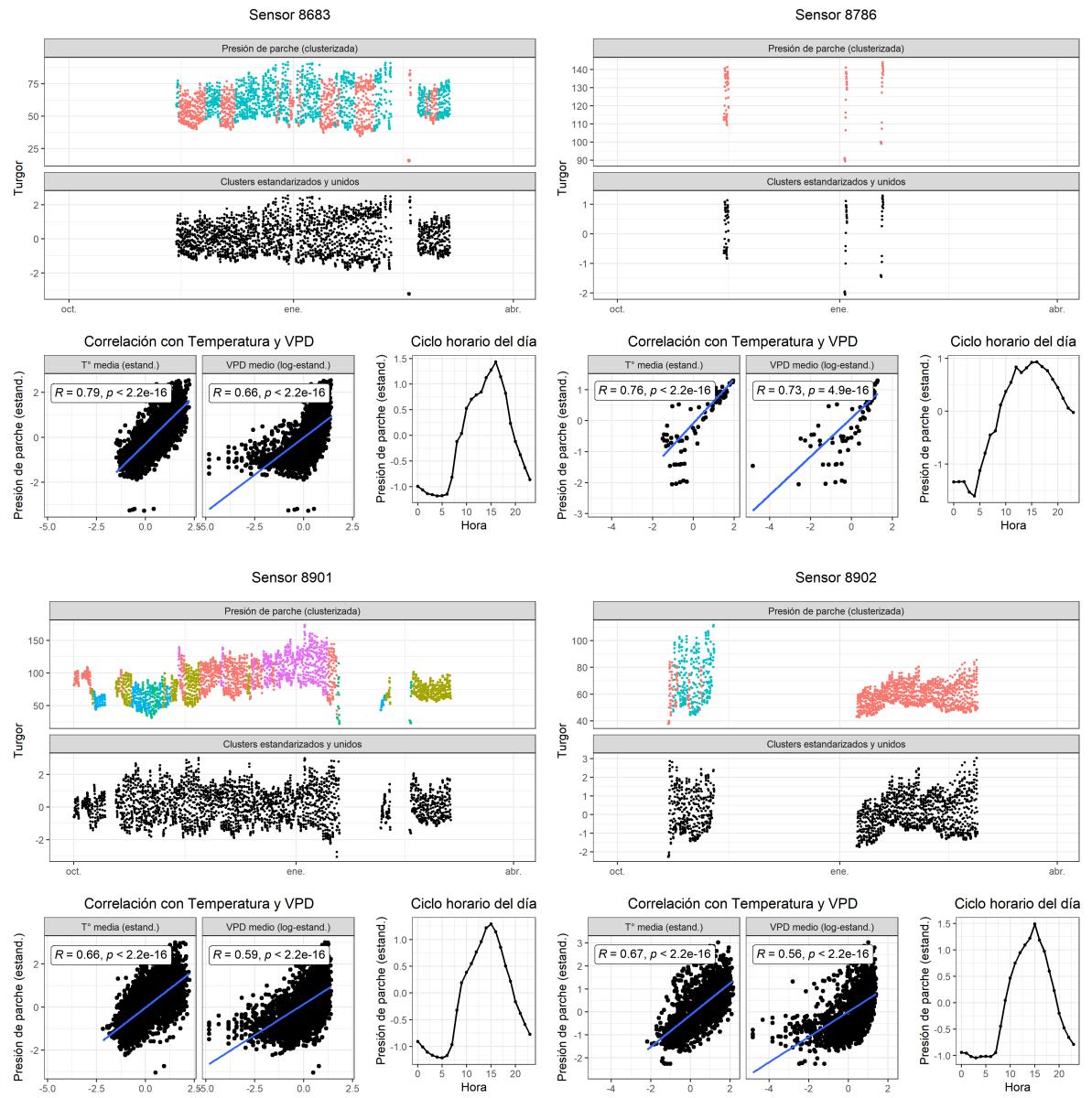




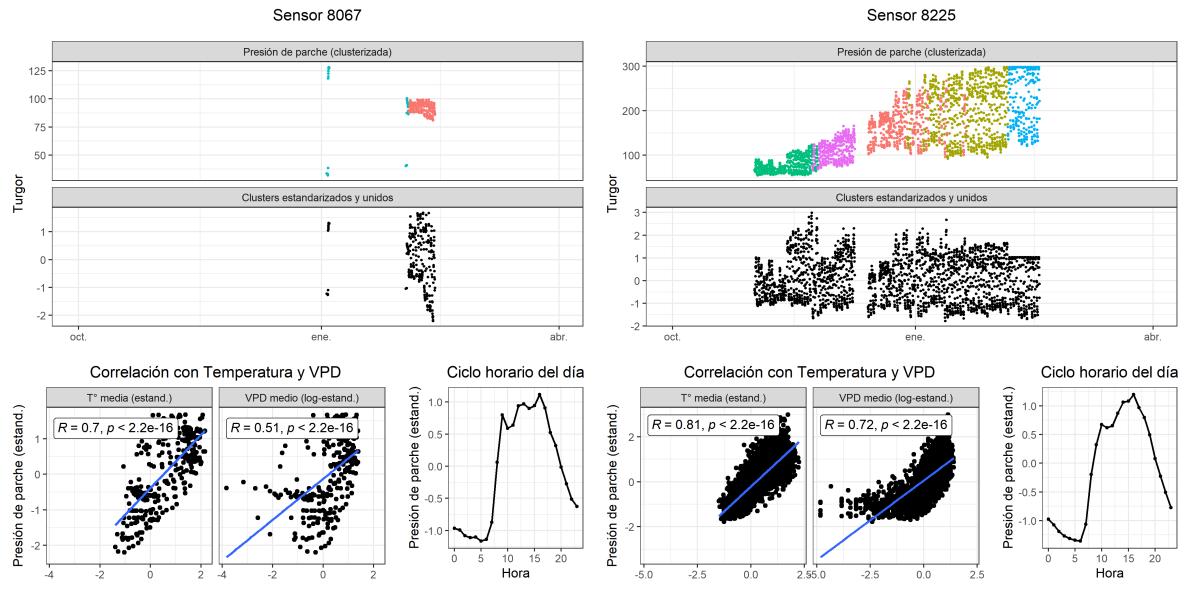
Unidad 3

95 T3 (2022-2023)

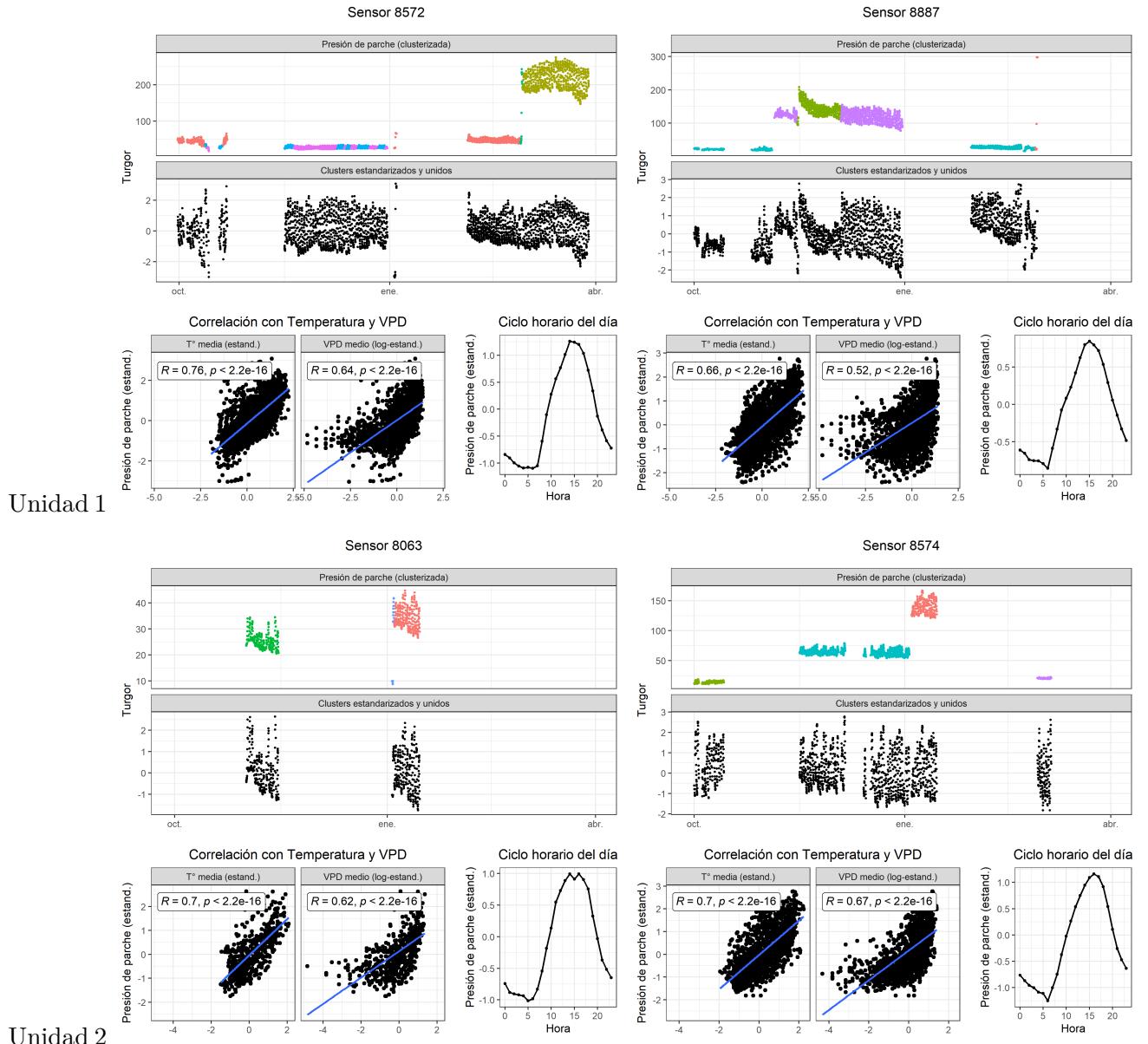
Unidad 1

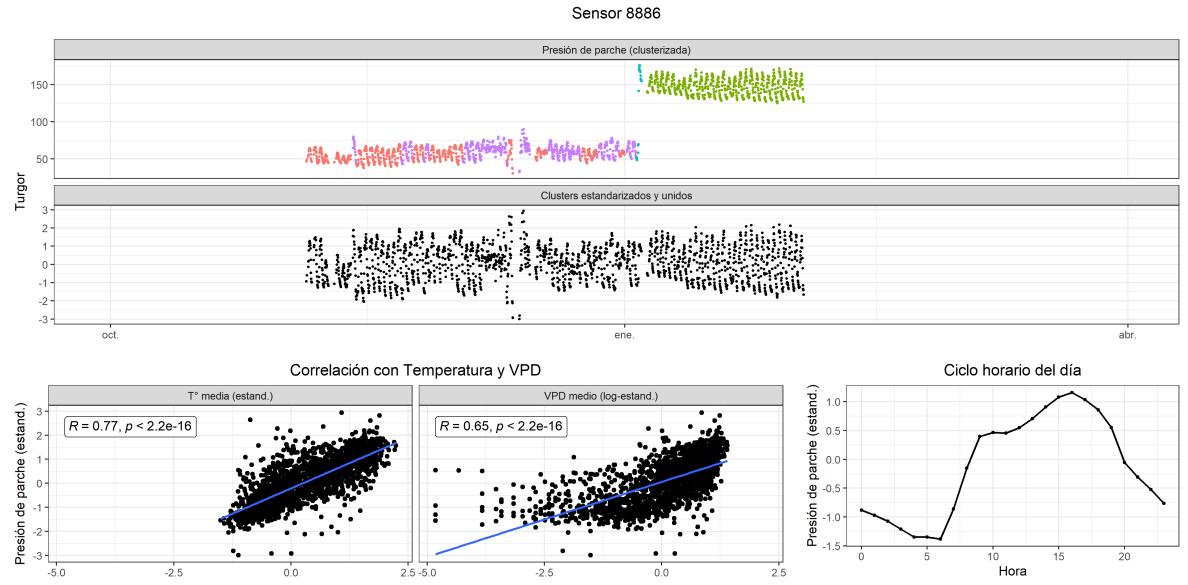


Unidad 3



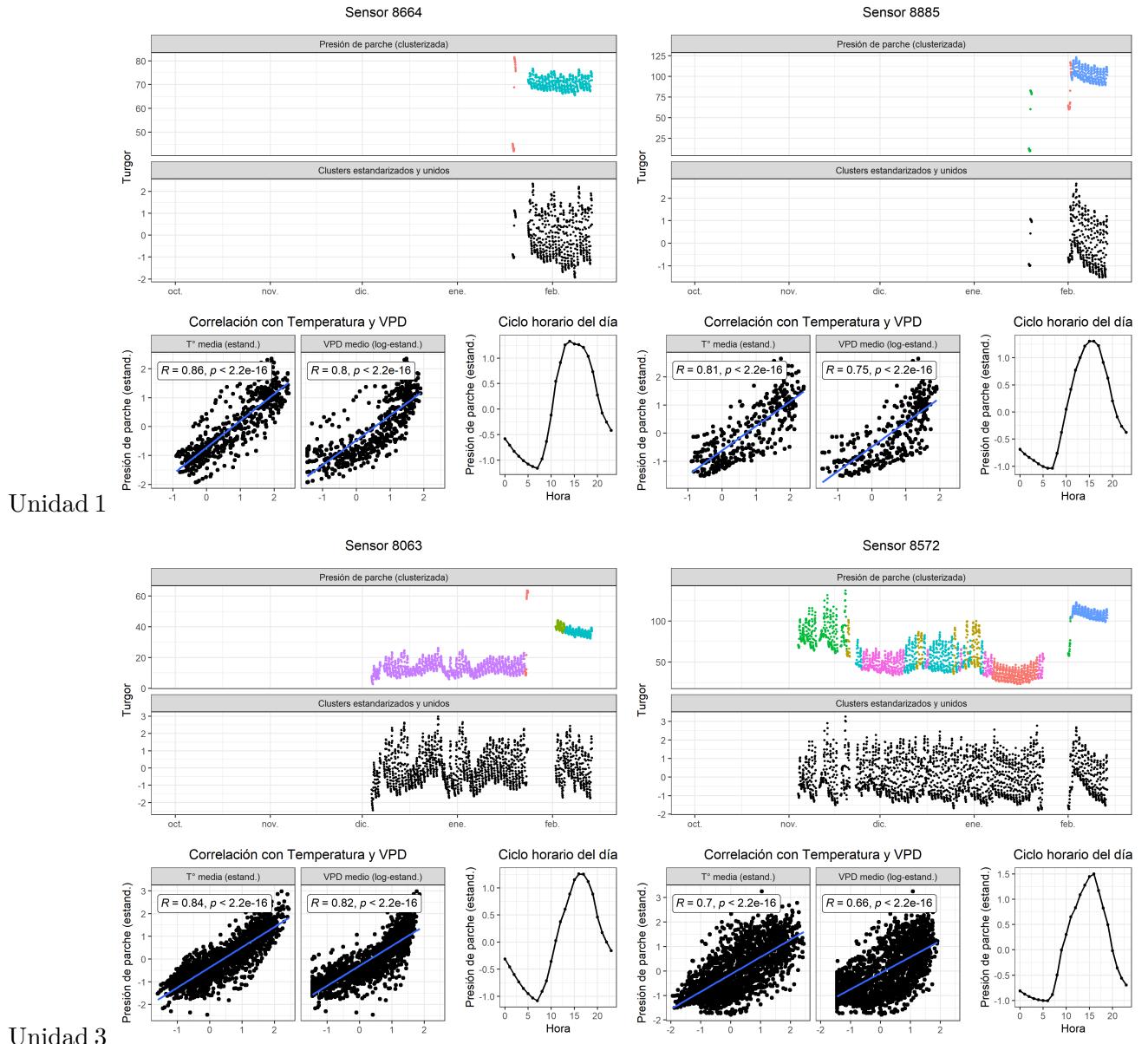
96 T4 (2022-2023)



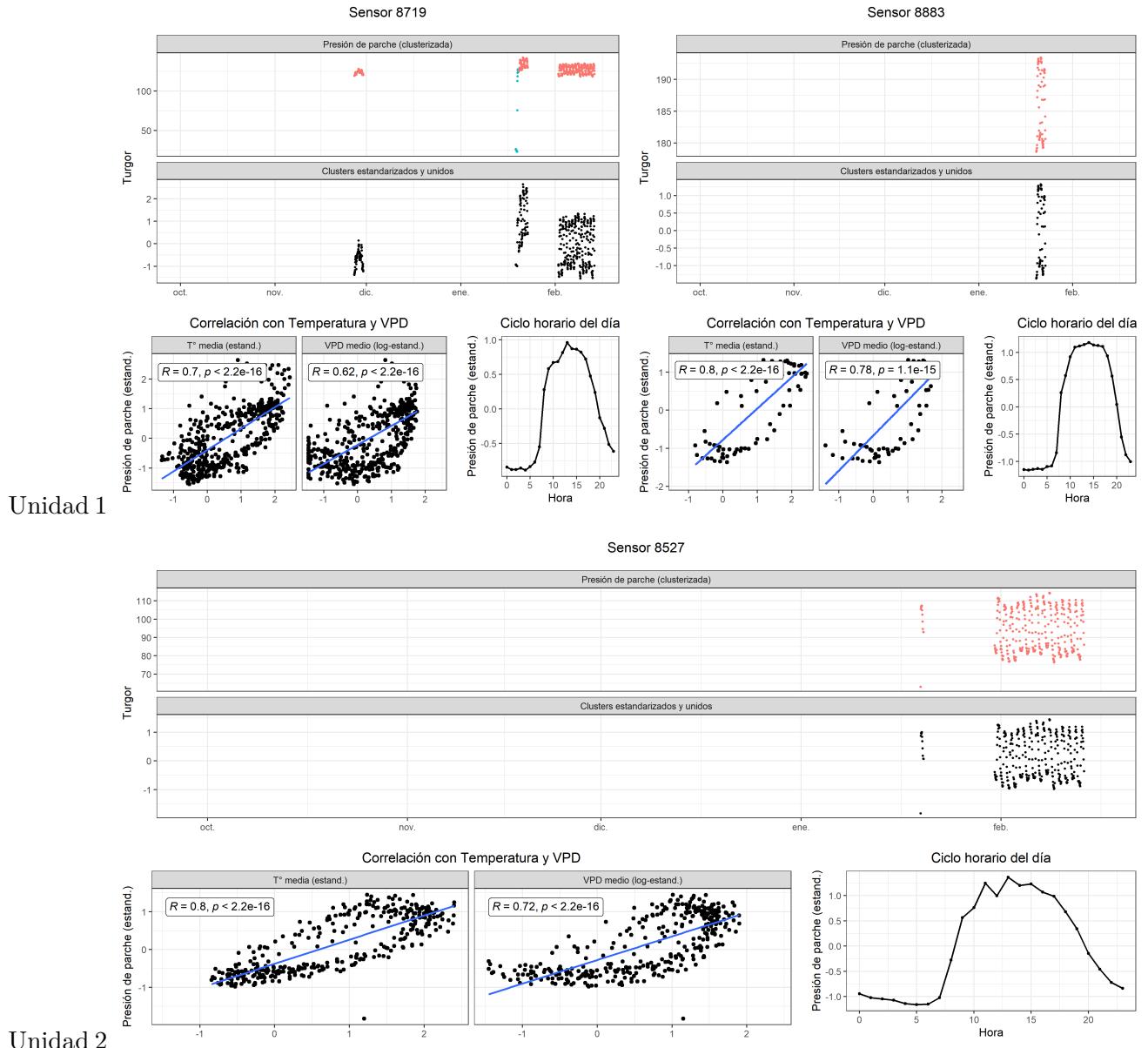


Unidad 3

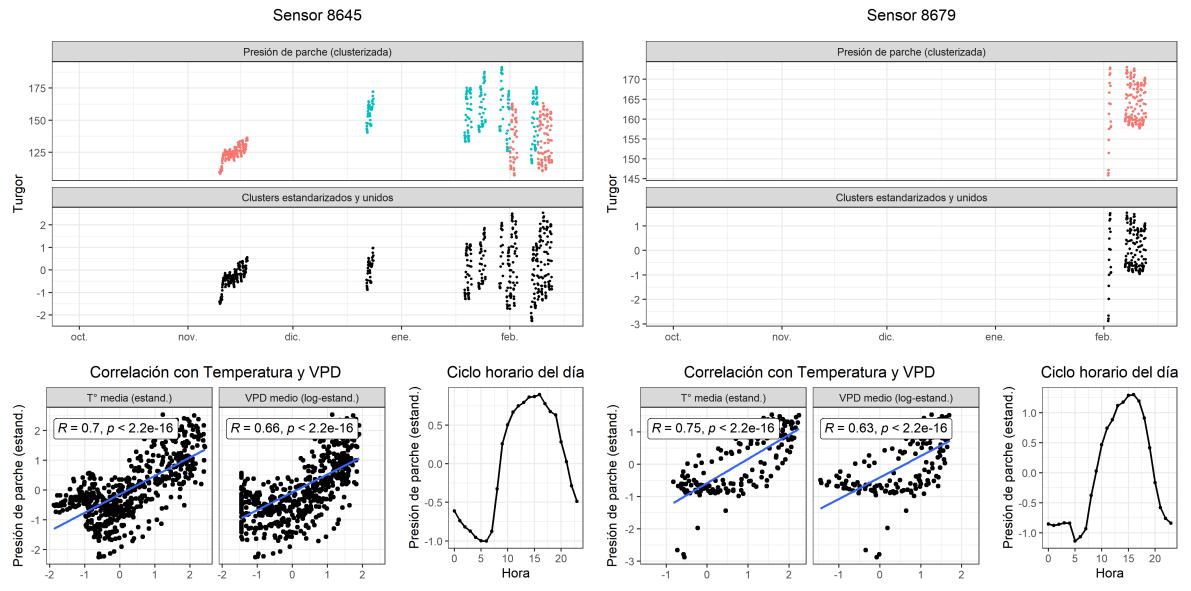
97 T1 (2023-2024)



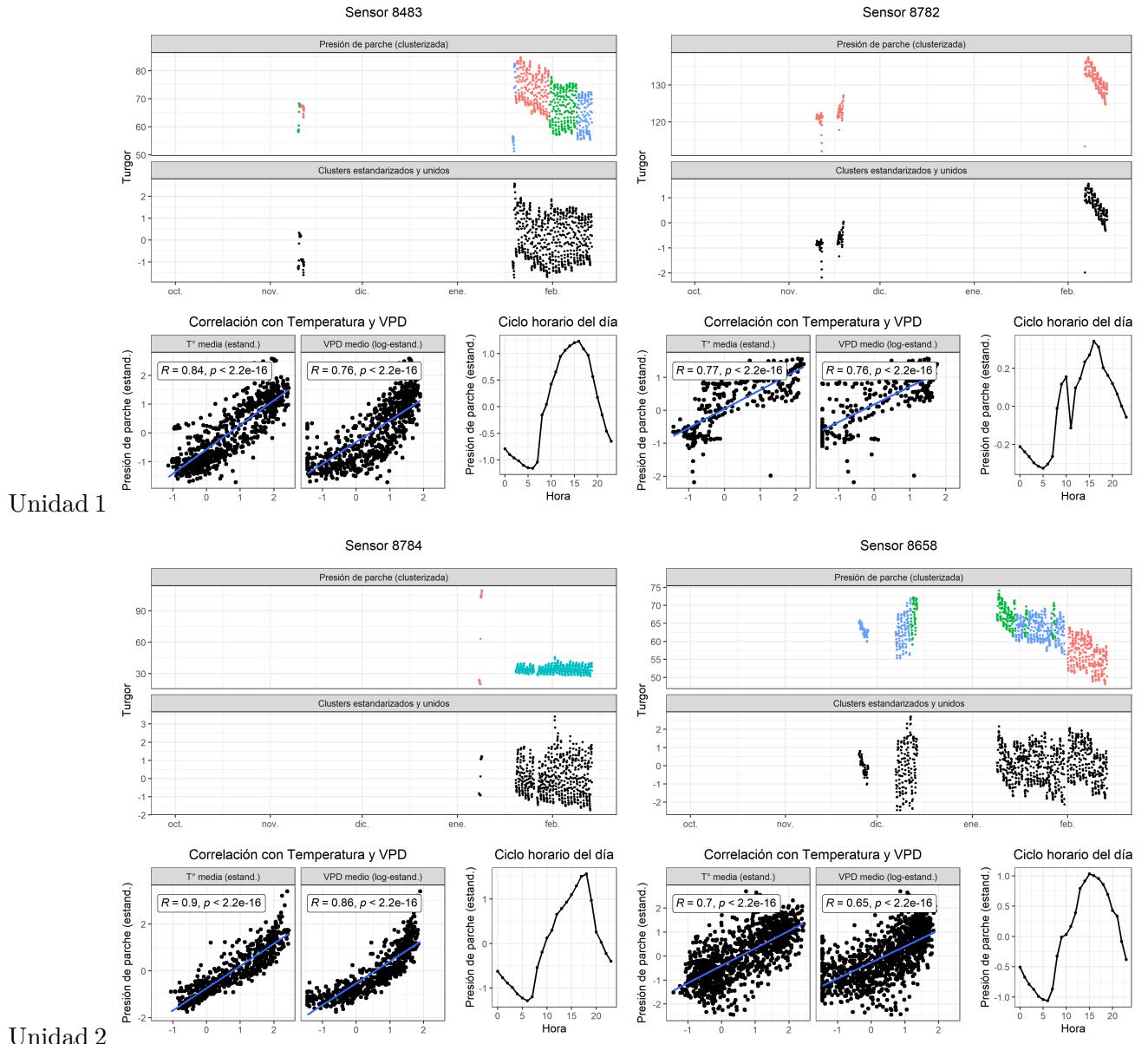
98 T2 (2023-2024)

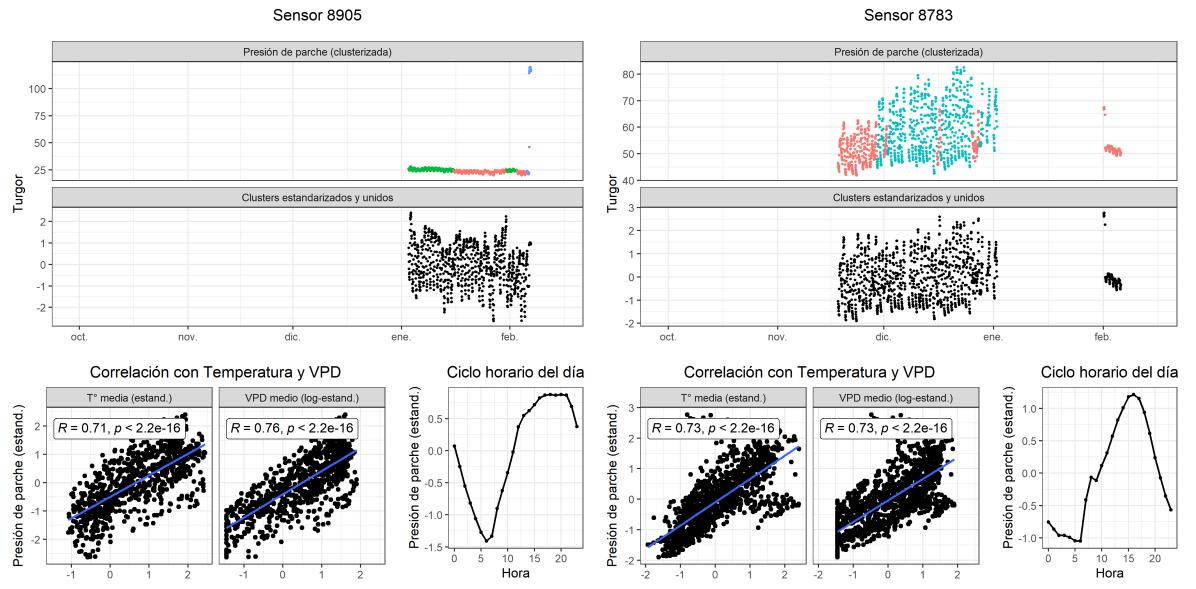


Unidad 3



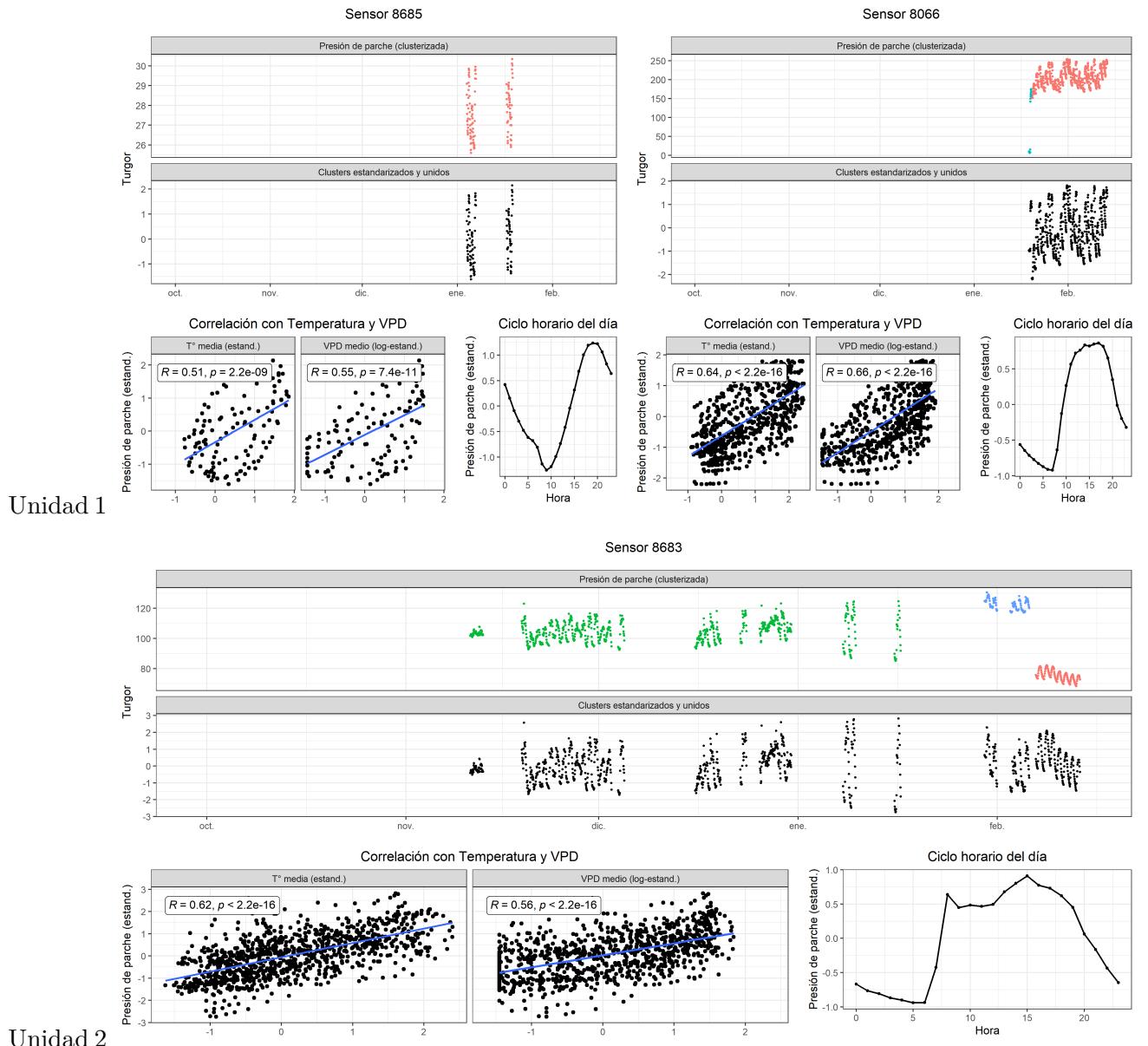
99 T3 (2023-2024)

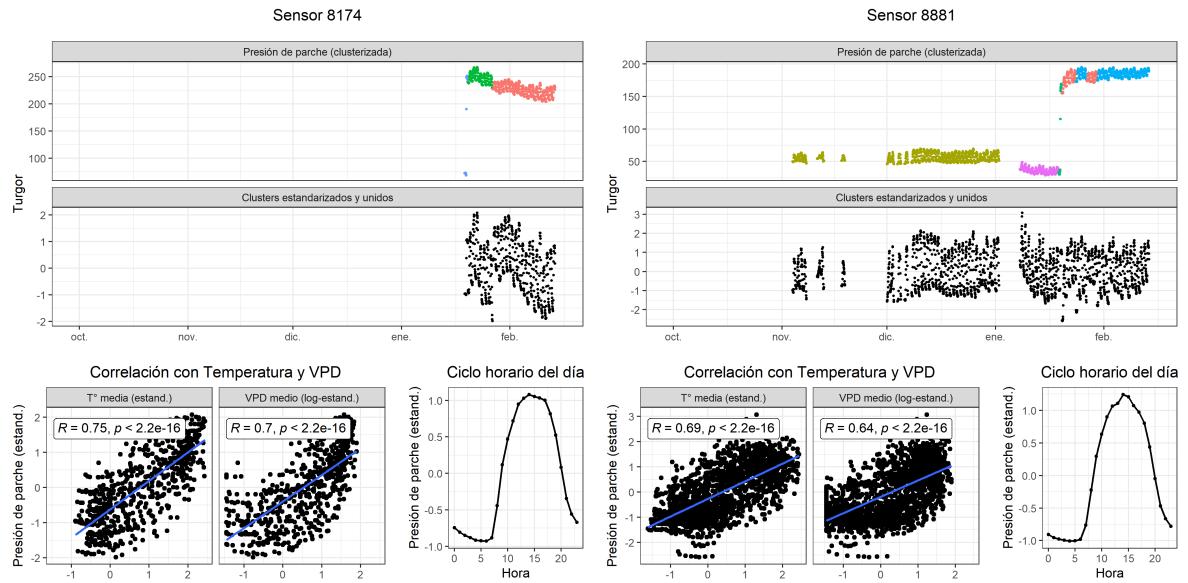




Unidad 3

100 T4 (2023-2024)





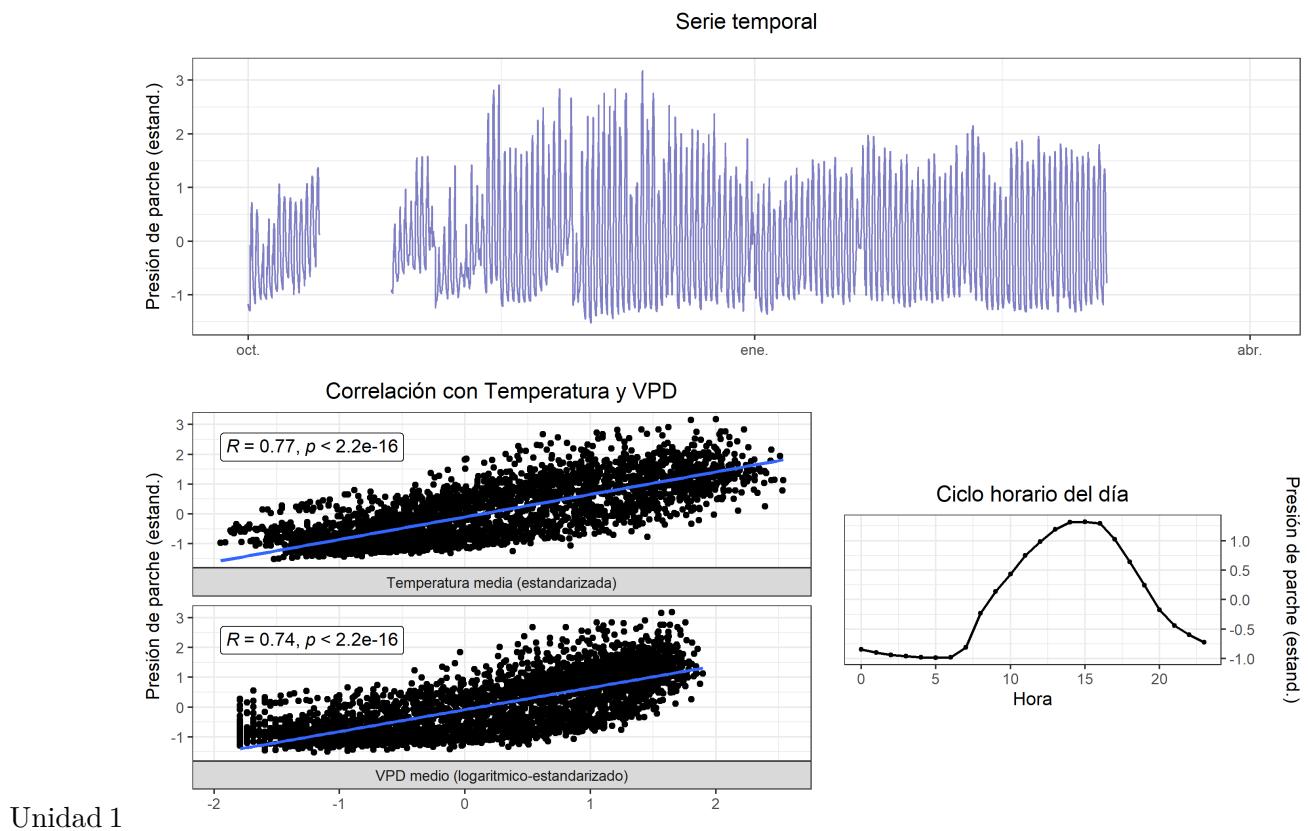
101 Datos preprocesados

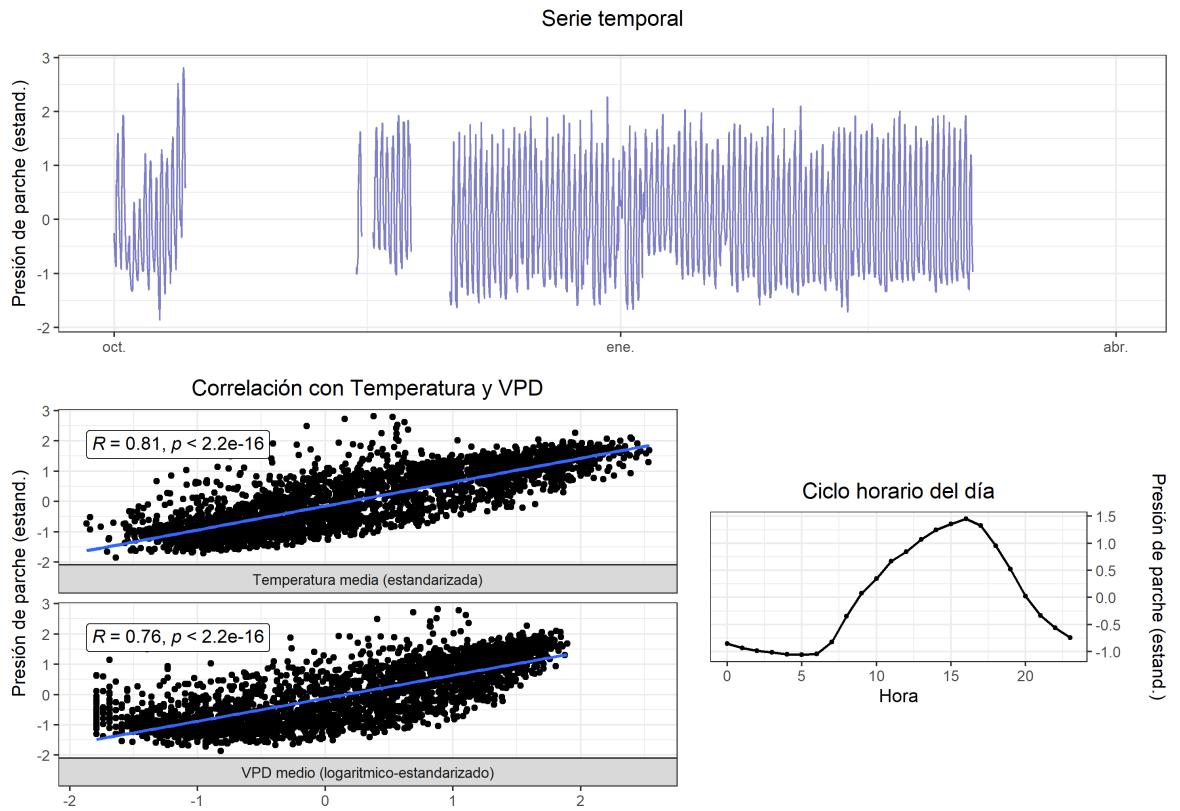
101.1 A nivel de unidad

Para obtener el turgor preprocesado por árbol según tratamiento, se promediaron las series de los sensores por cada unidad, obteniendo una serie única para cada árbol de los tratamientos.

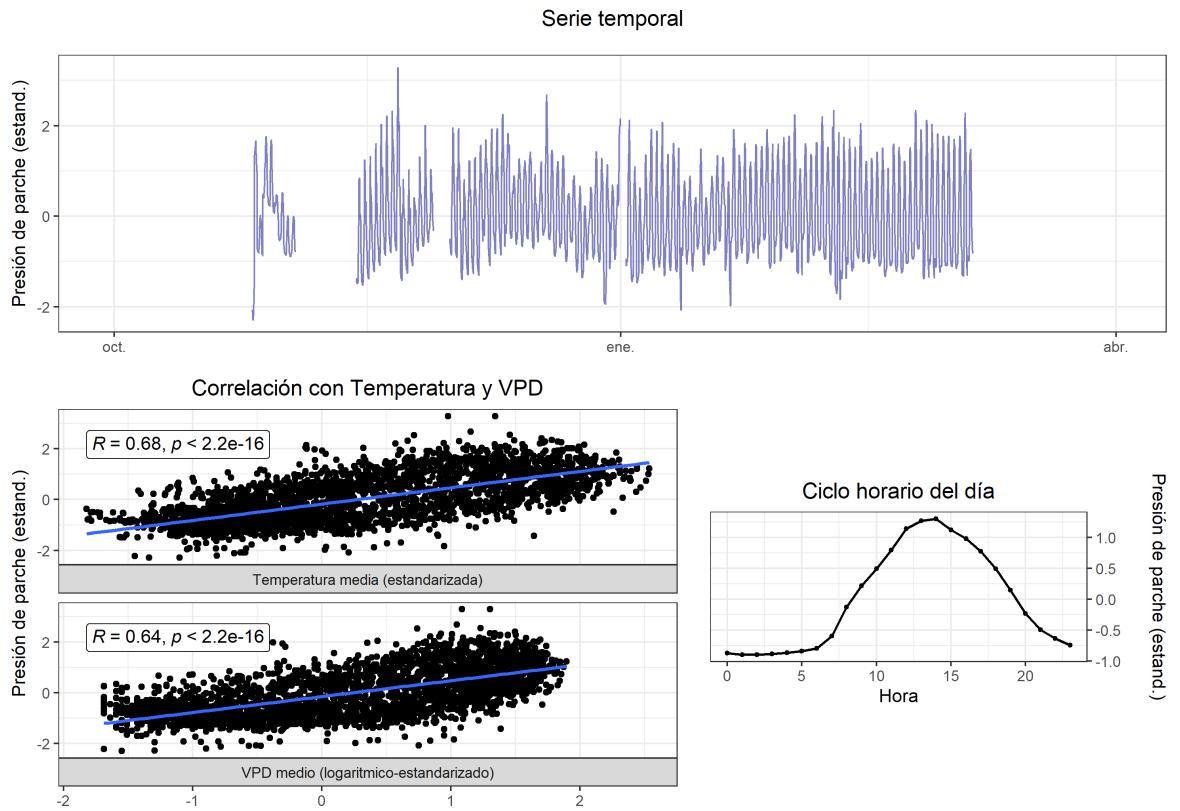
101.1.1 La Esperanza

102 T1 (2022-2023)



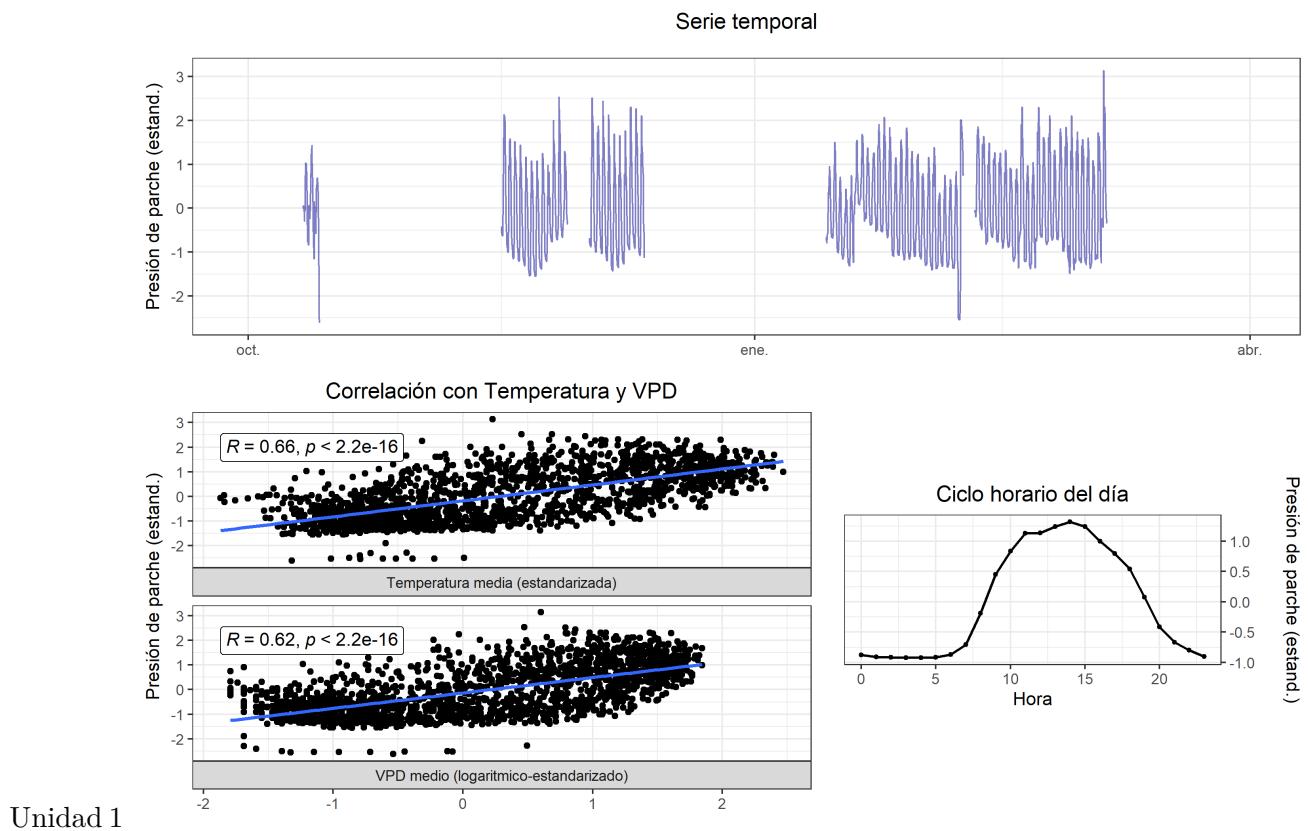


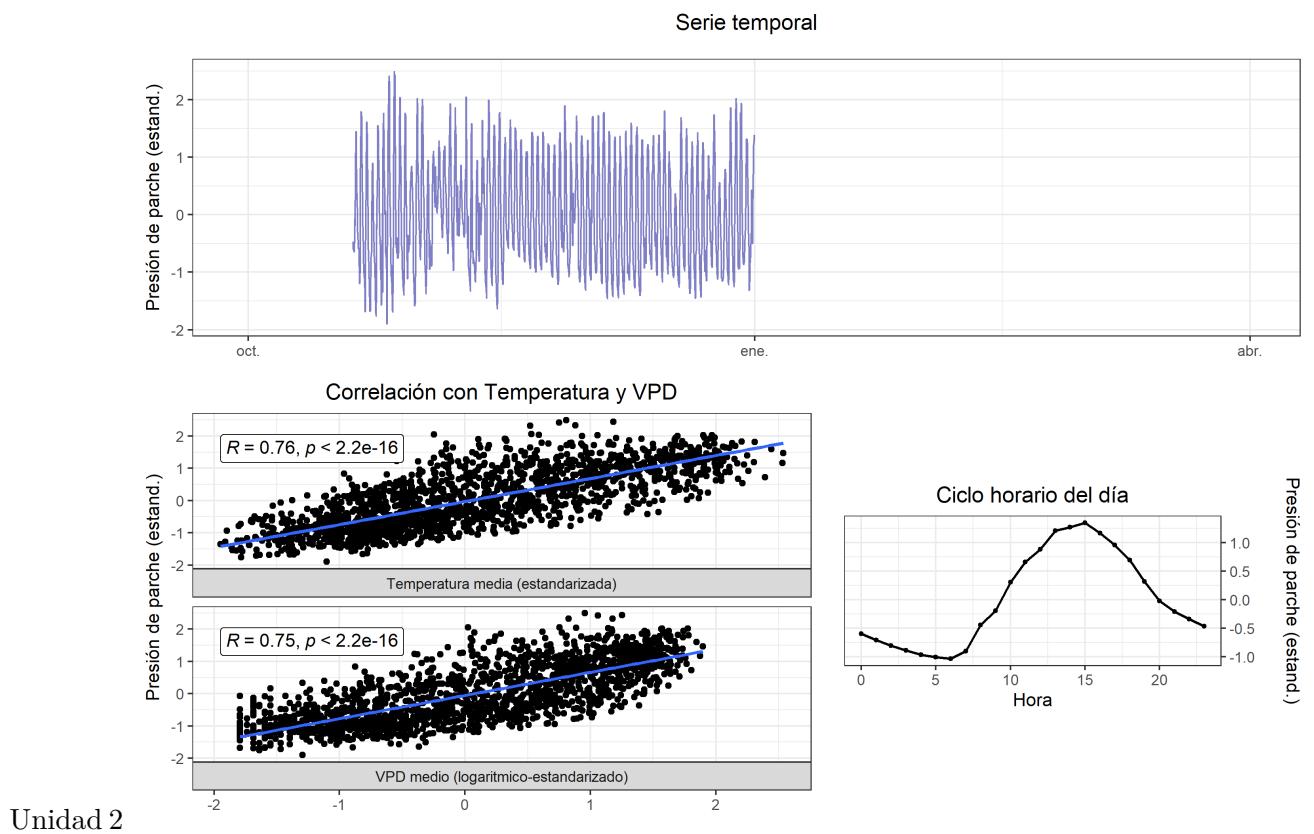
Unidad 2

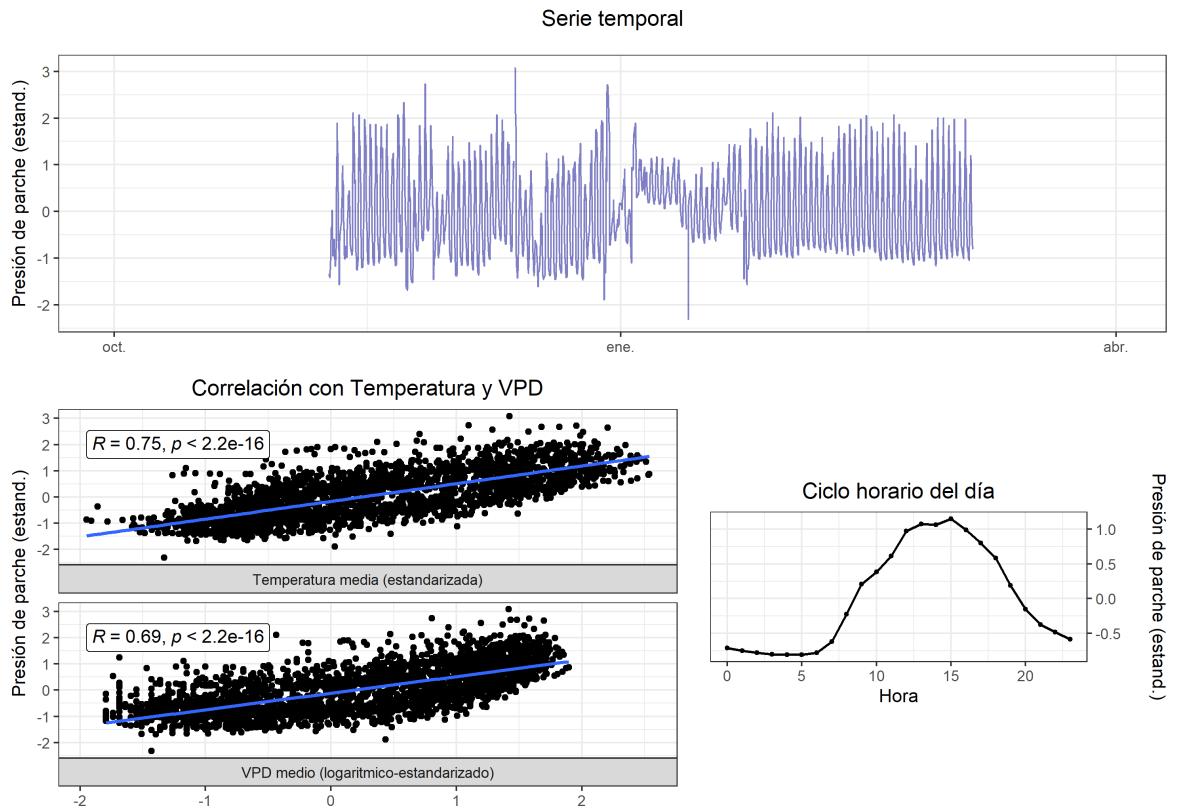


Unidad 3

103 T2 (2022-2023)

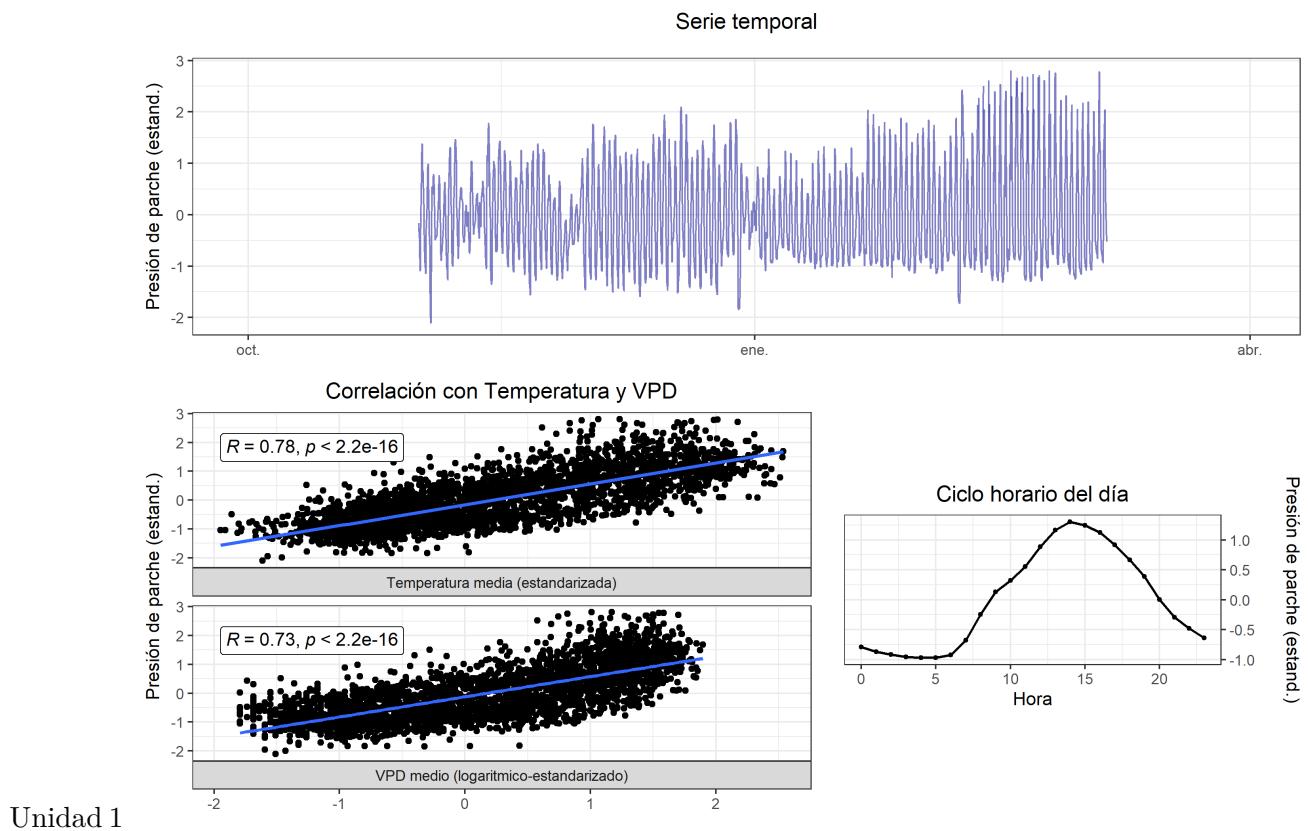


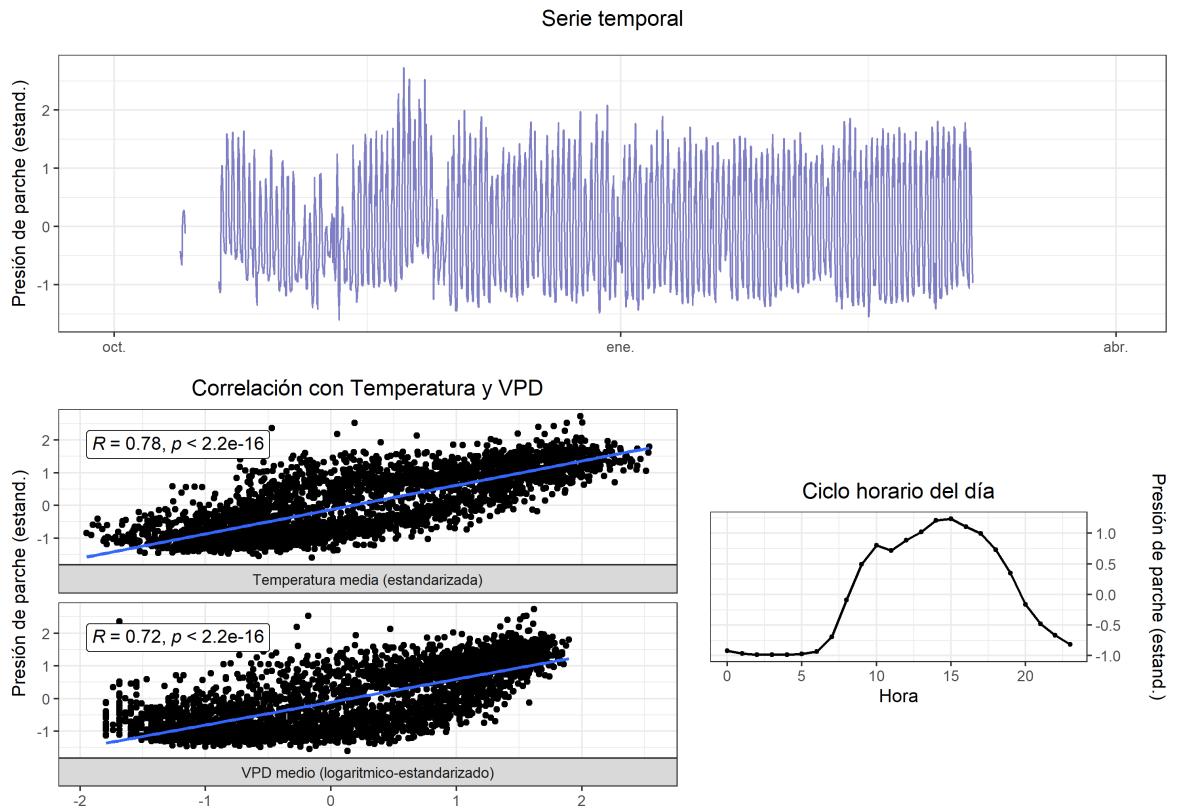




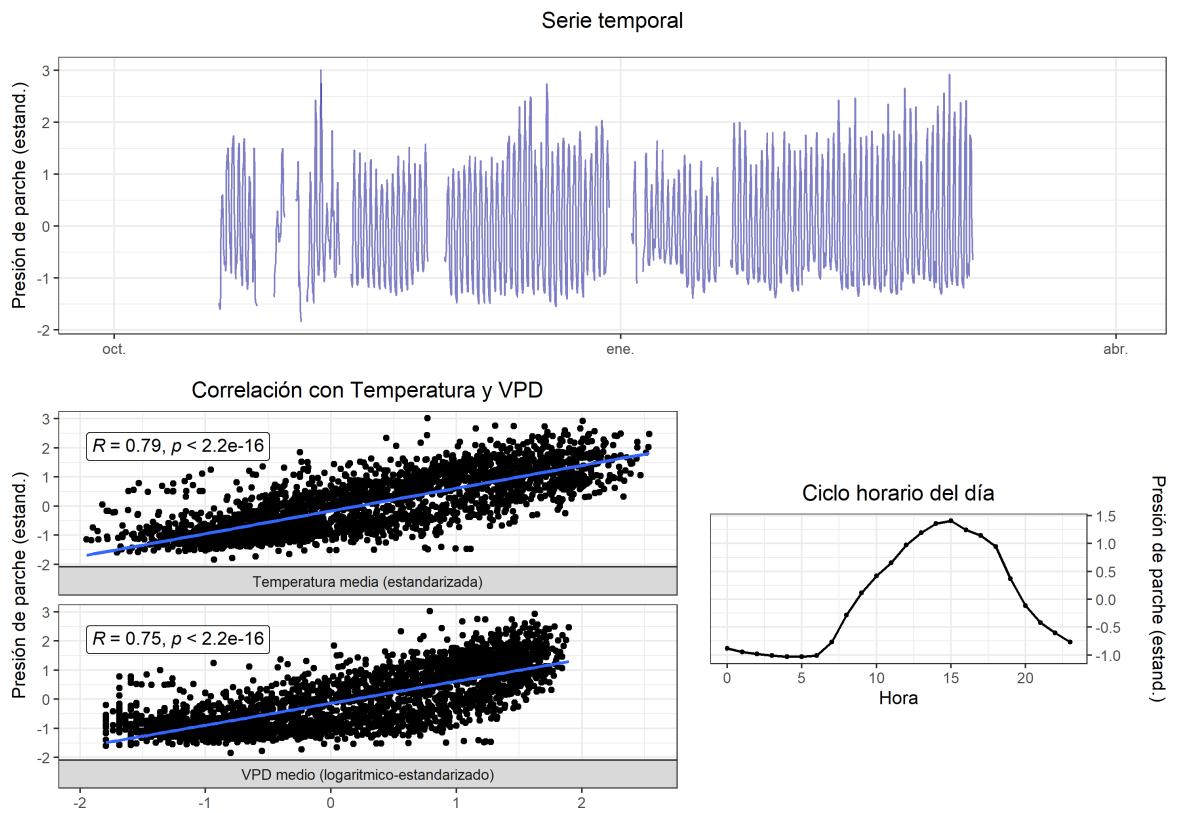
Unidad 3

104 T3 (2022-2023)



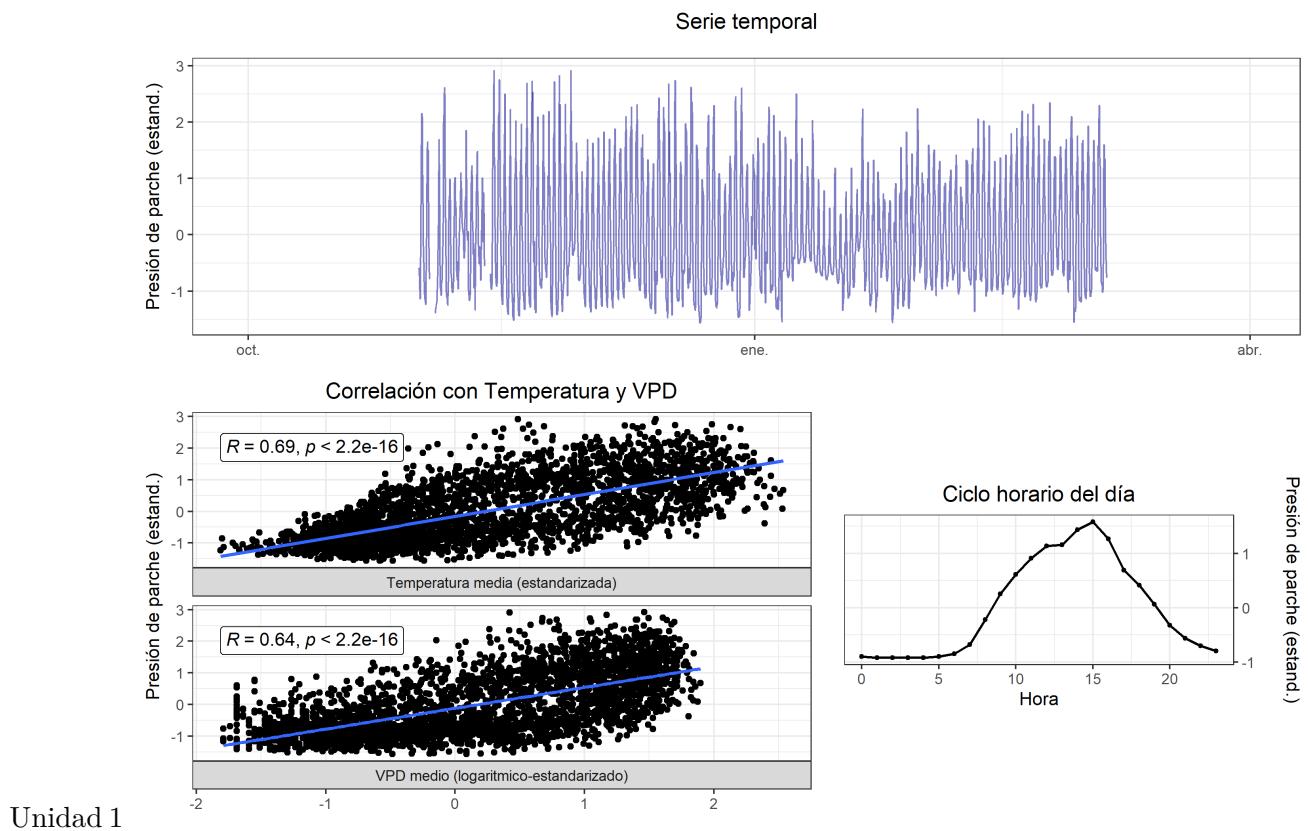


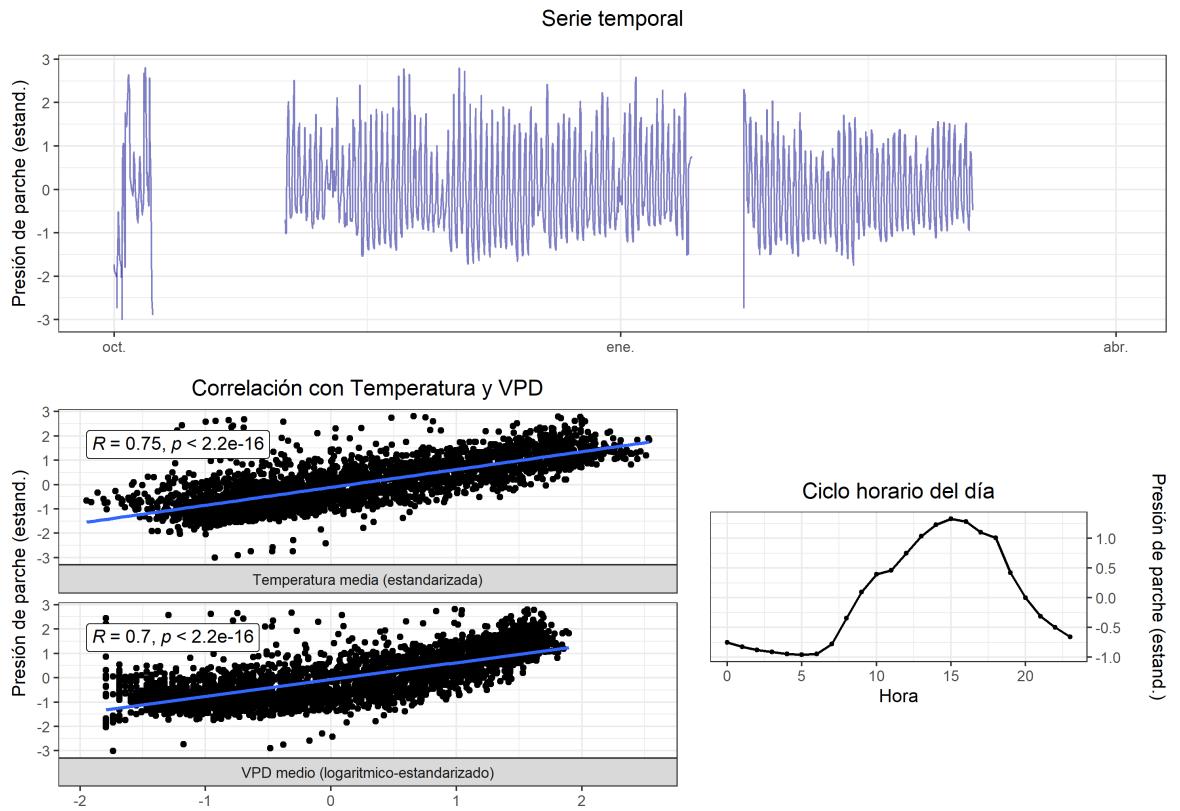
Unidad 2



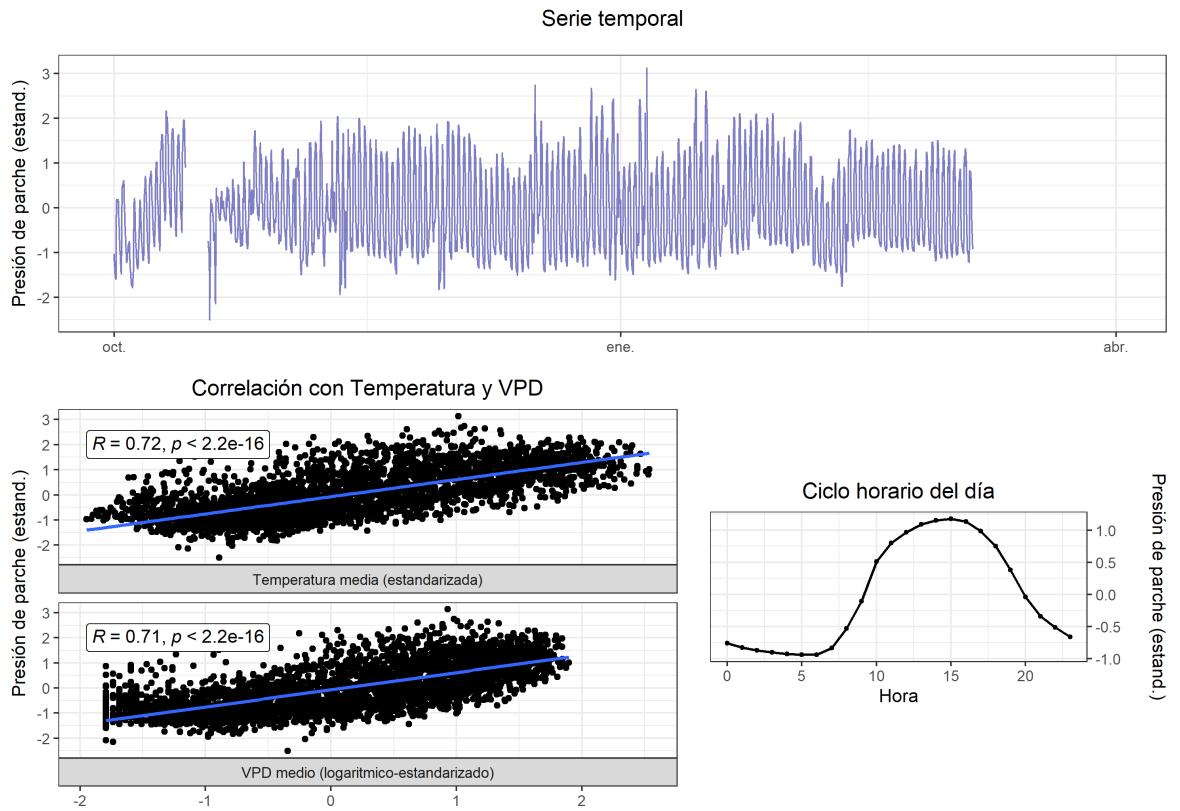
Unidad 3

105 T4 (2022-2023)



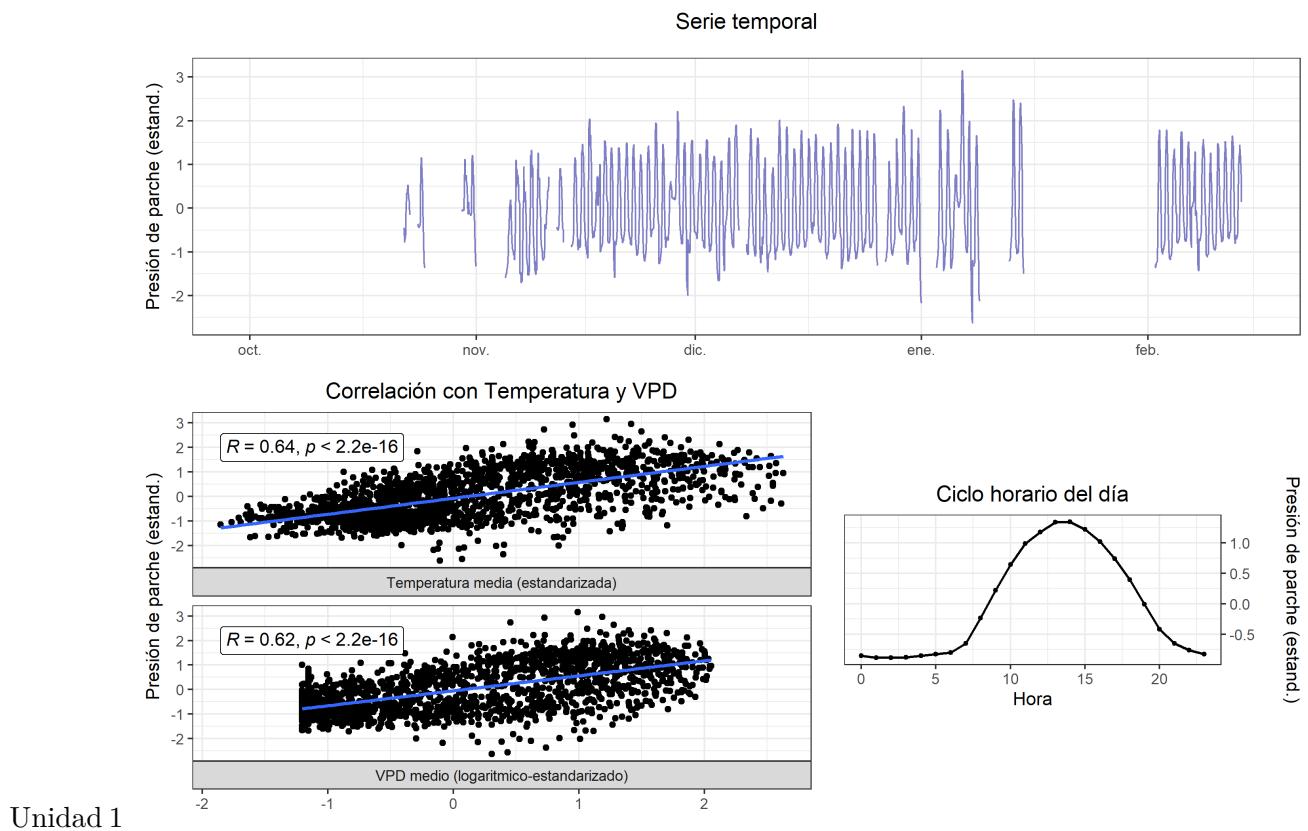


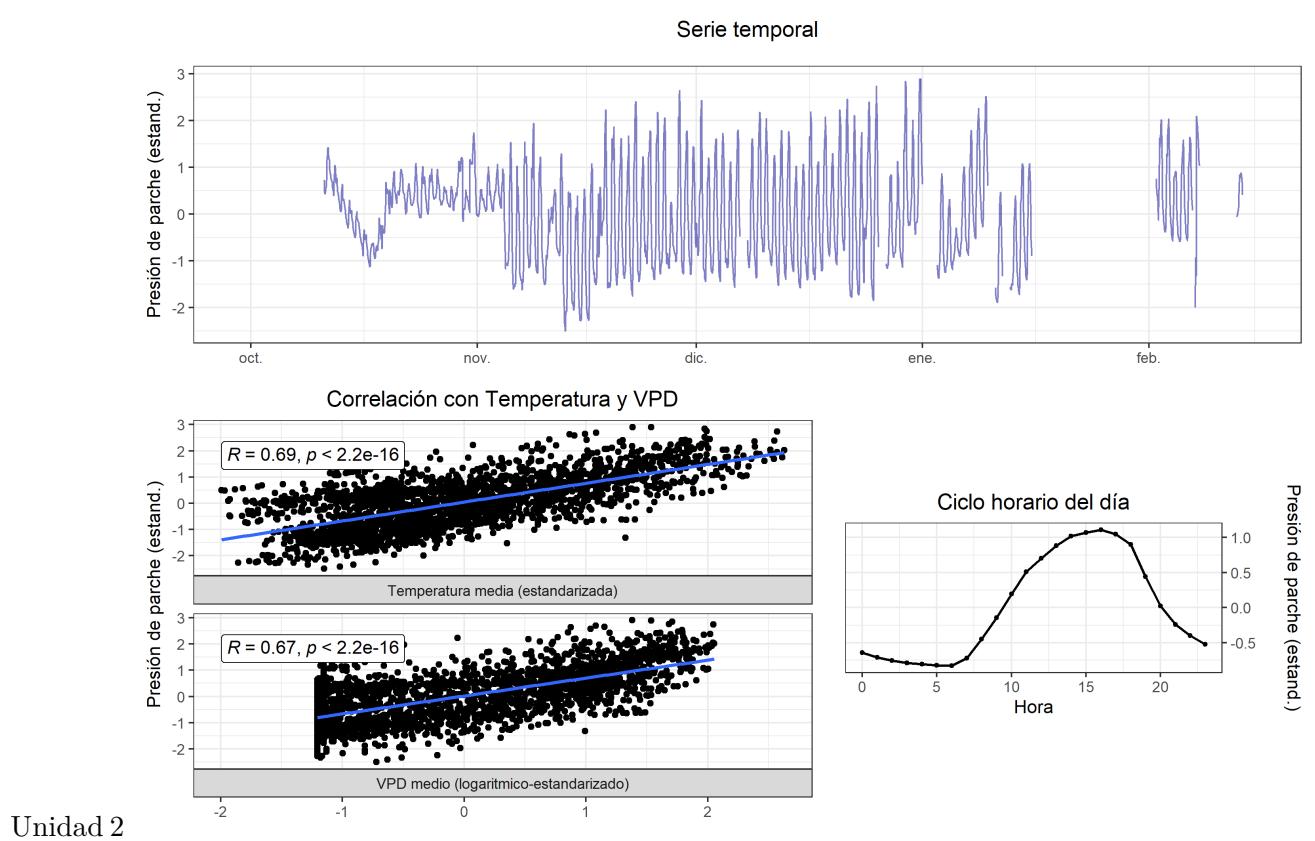
Unidad 2



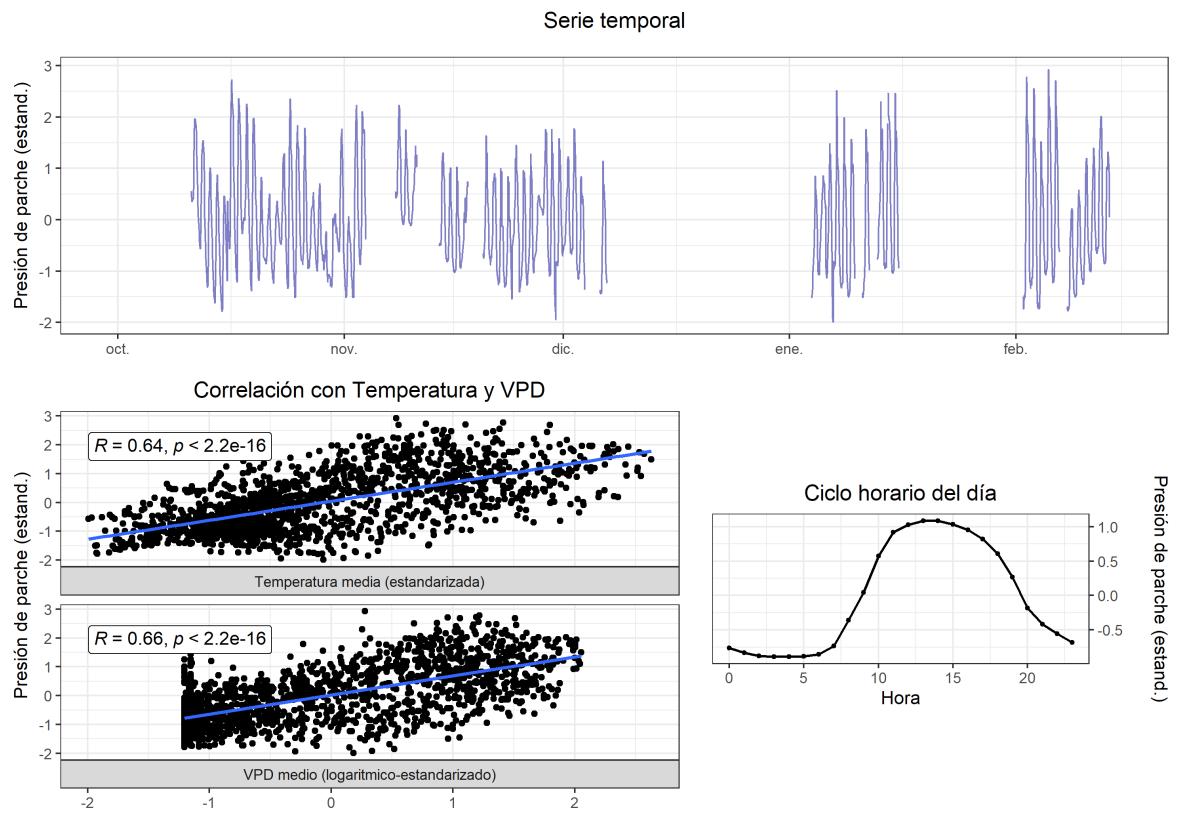
Unidad 3

106 T1 (2023-2024)



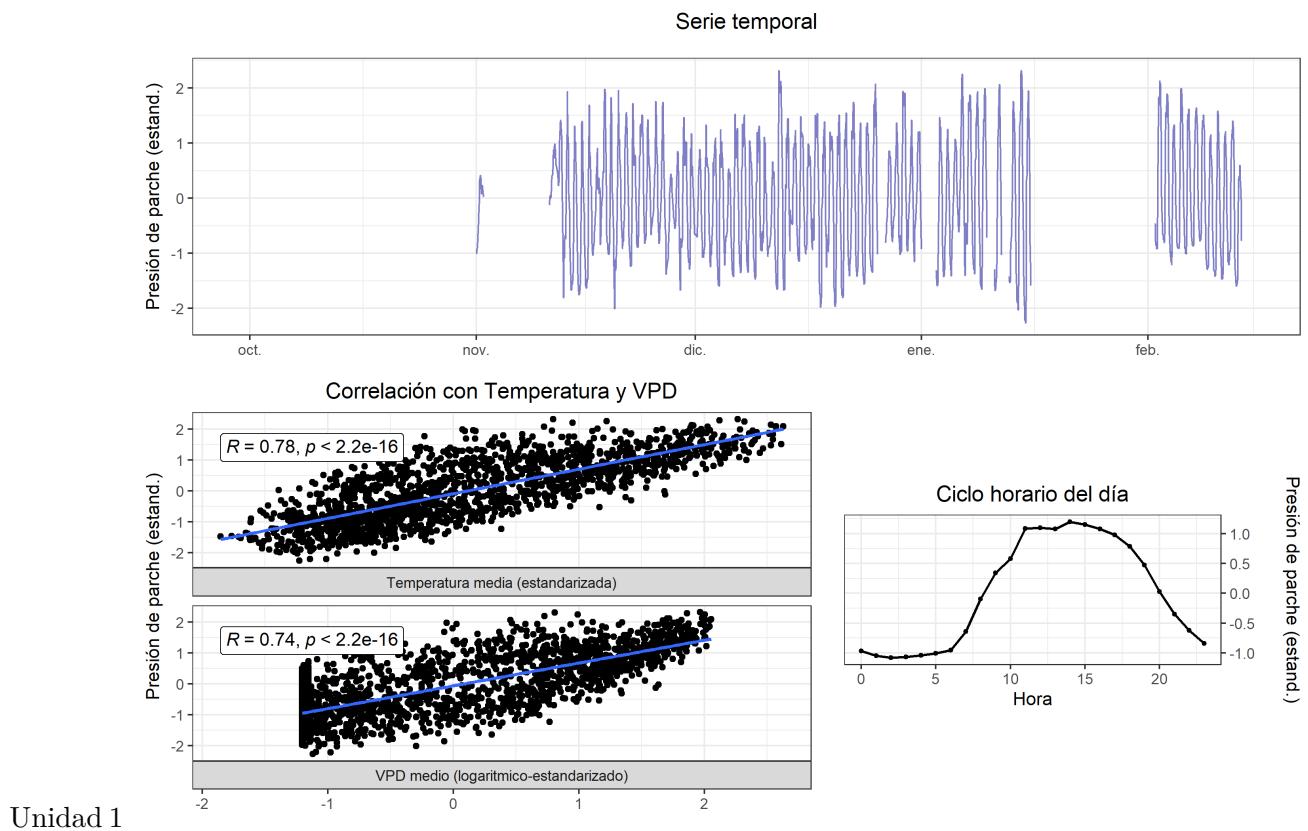


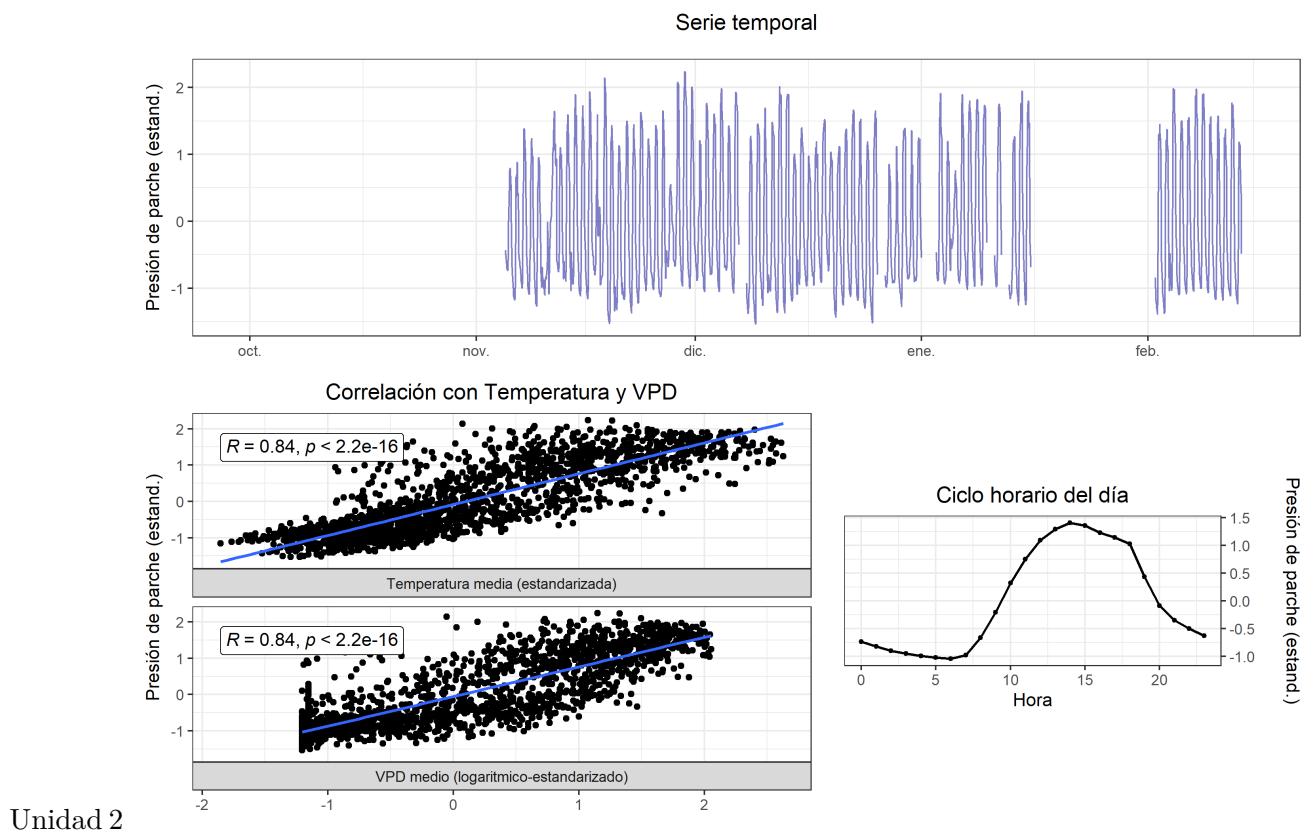
Unidad 2



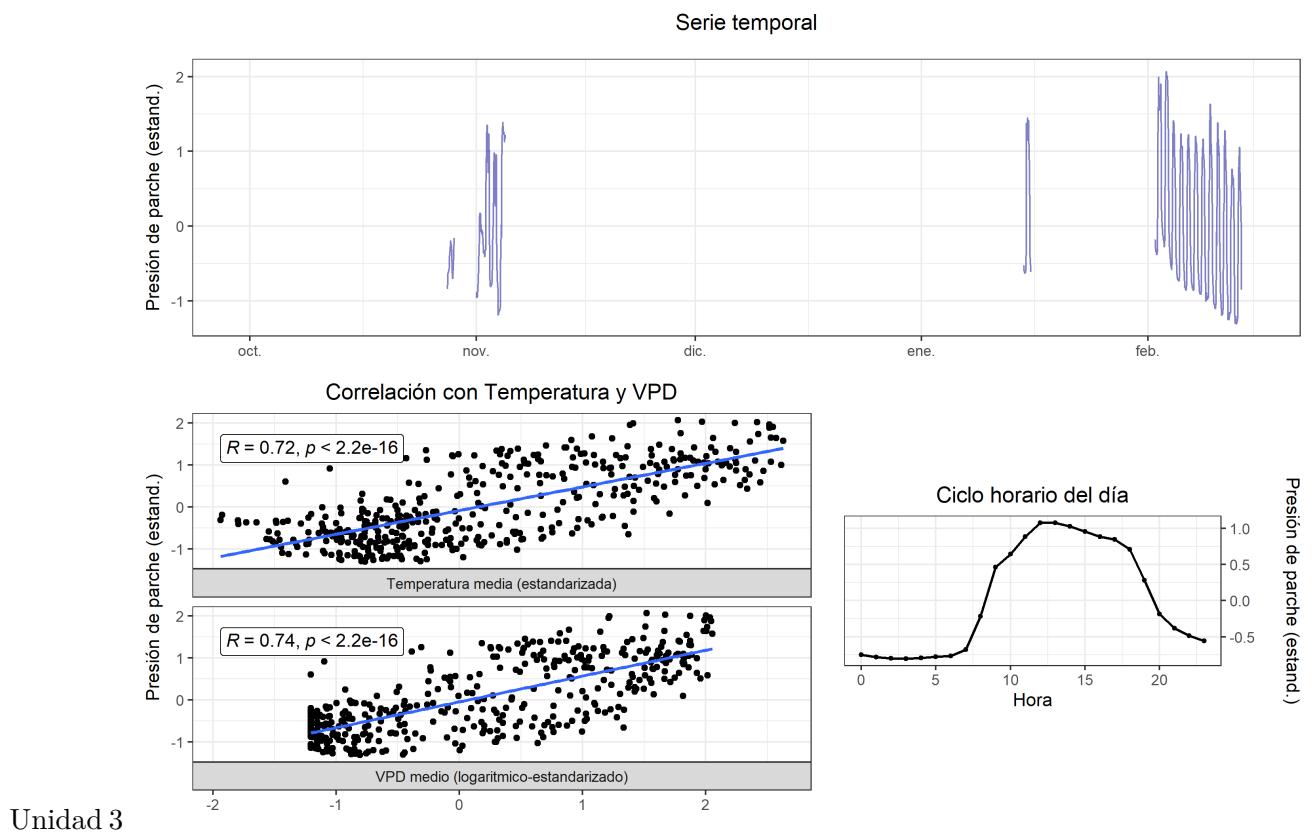
Unidad 3

107 T2 (2023-2024)



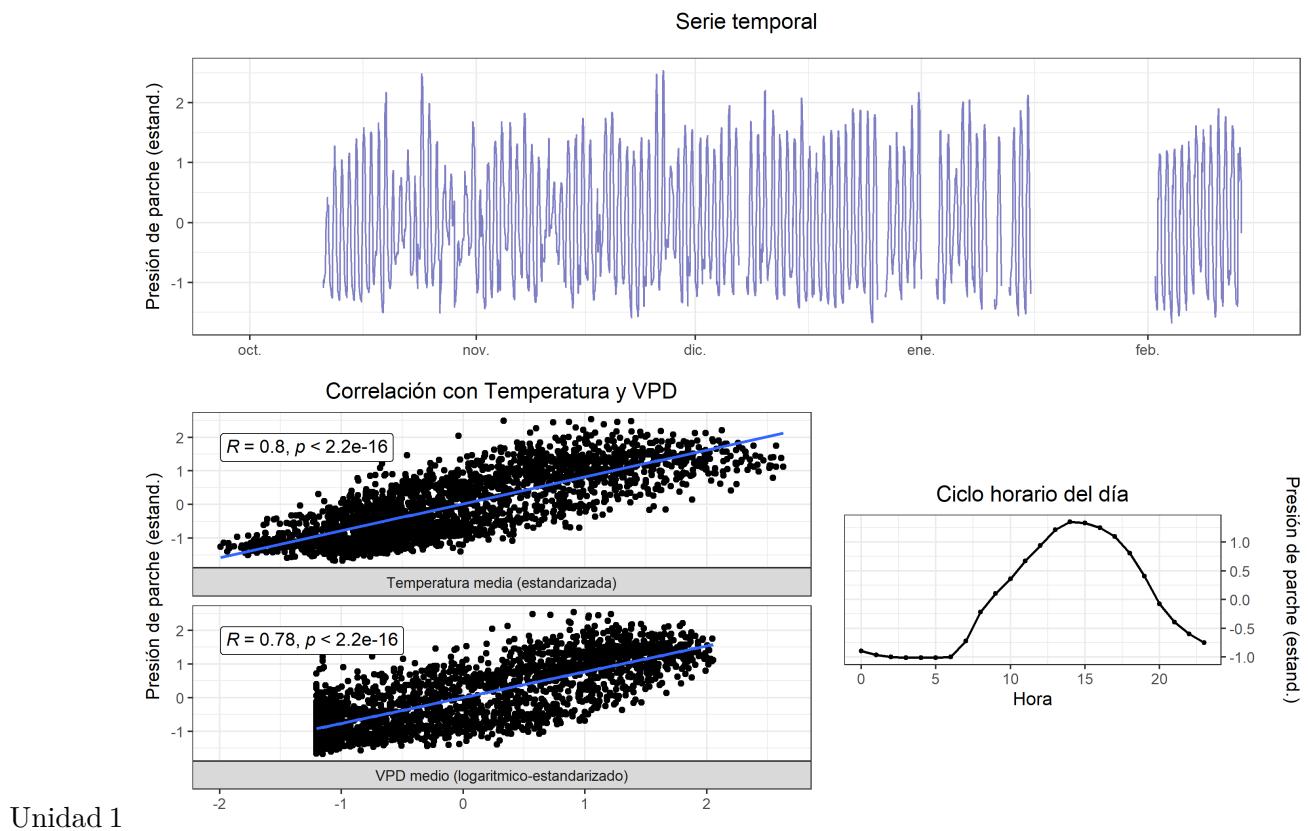


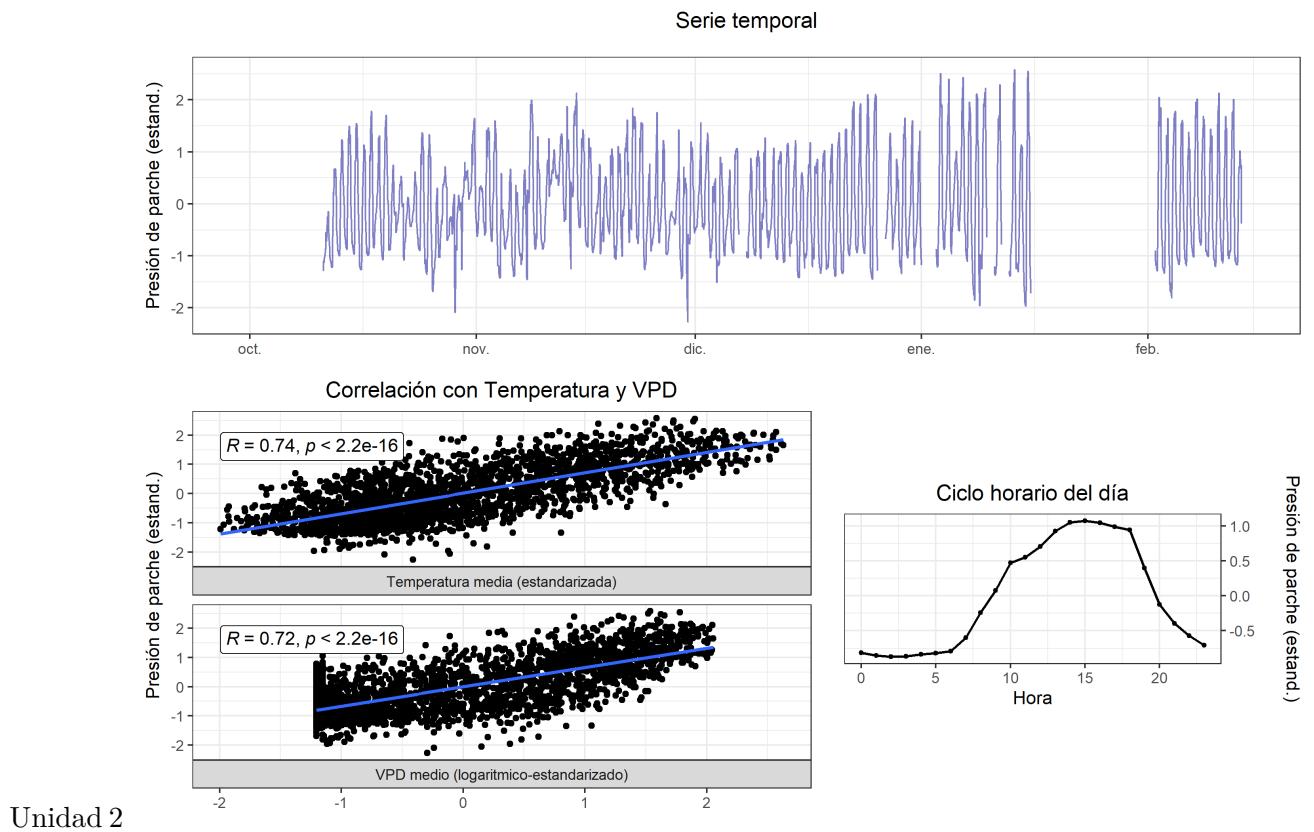
Unidad 2

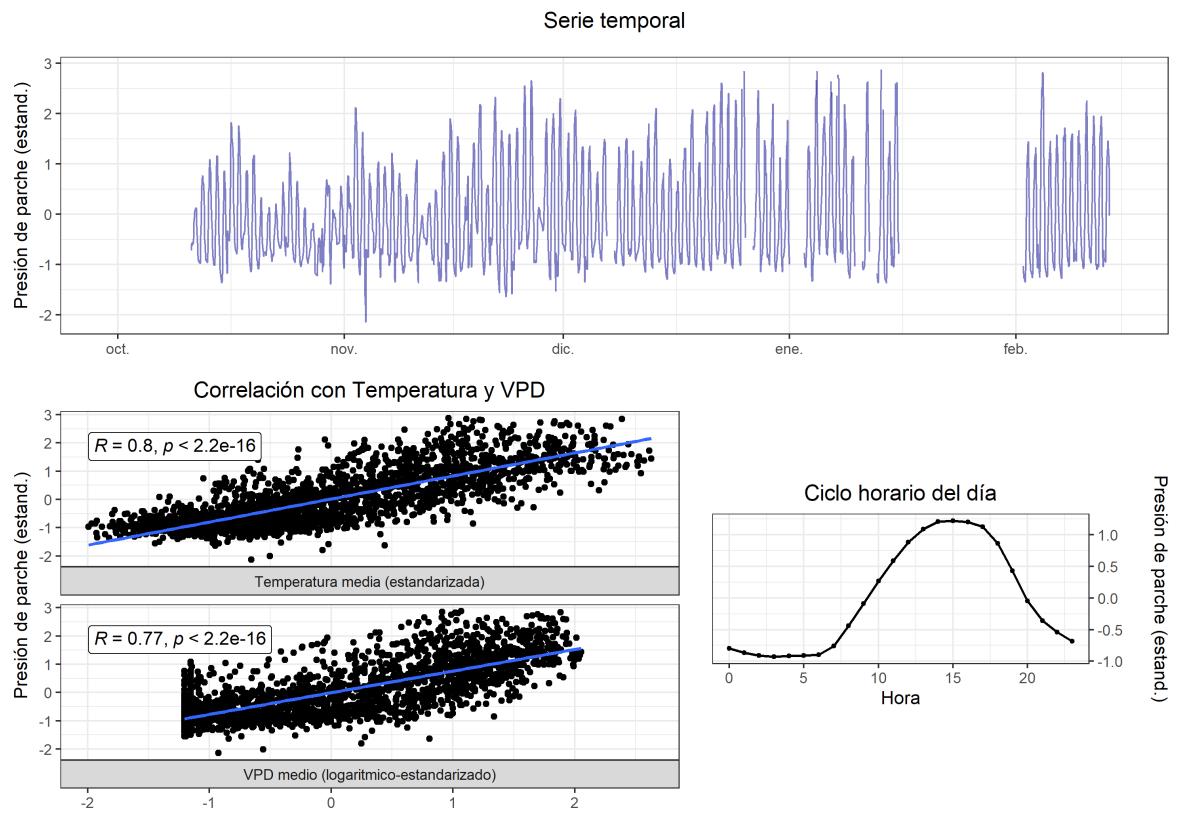


Unidad 3

108 T3 (2023-2024)

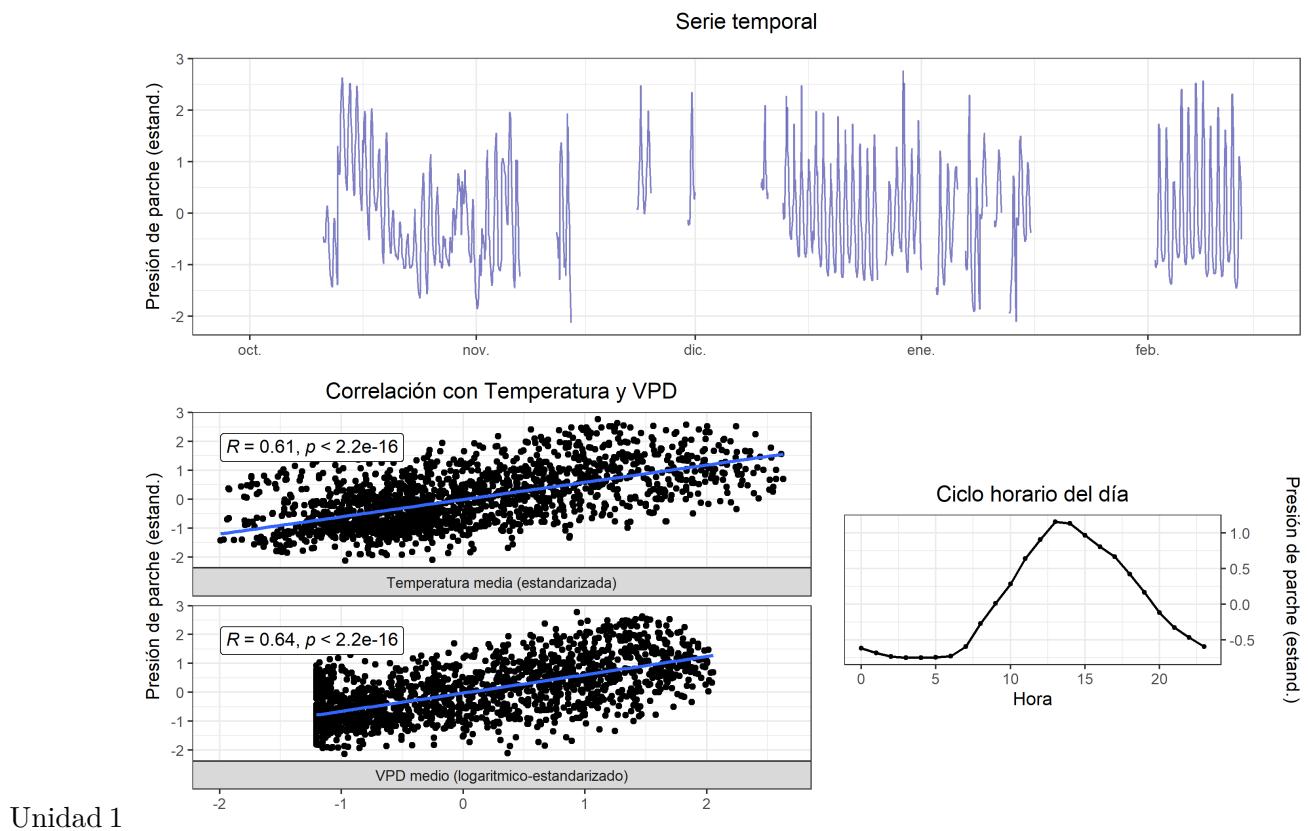






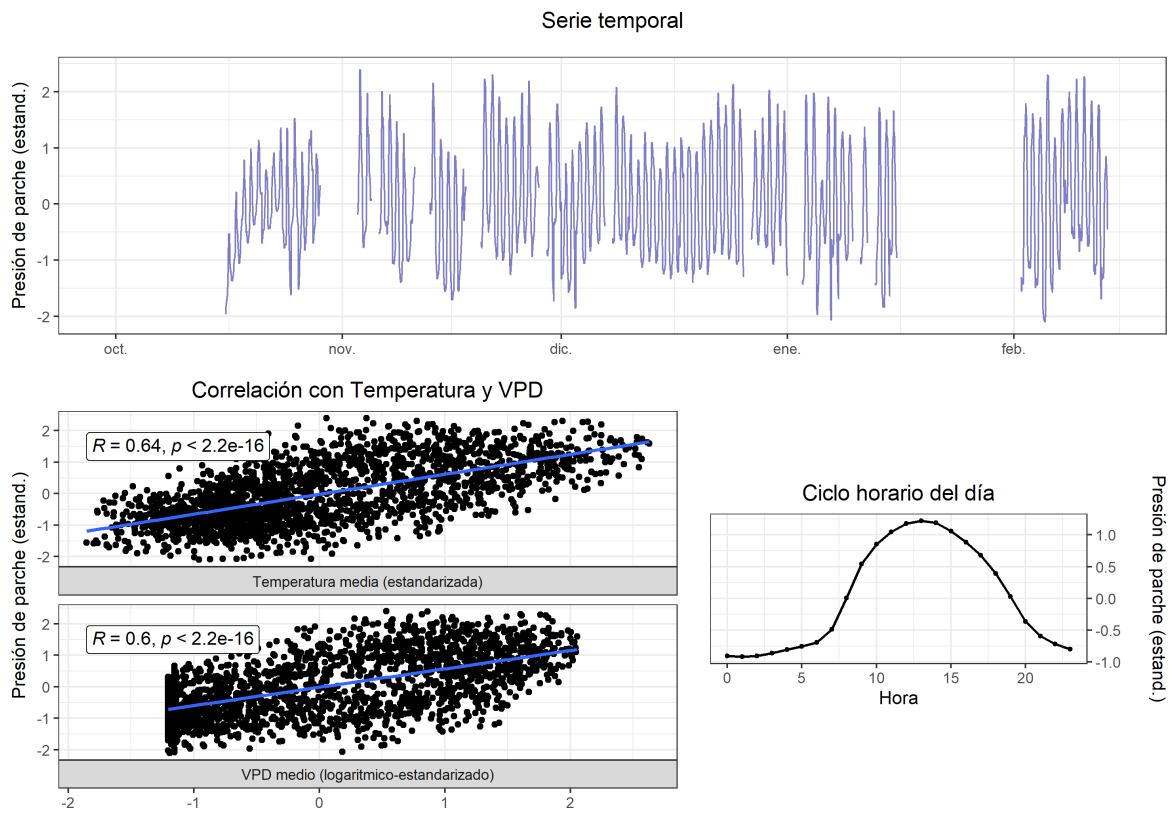
Unidad 3

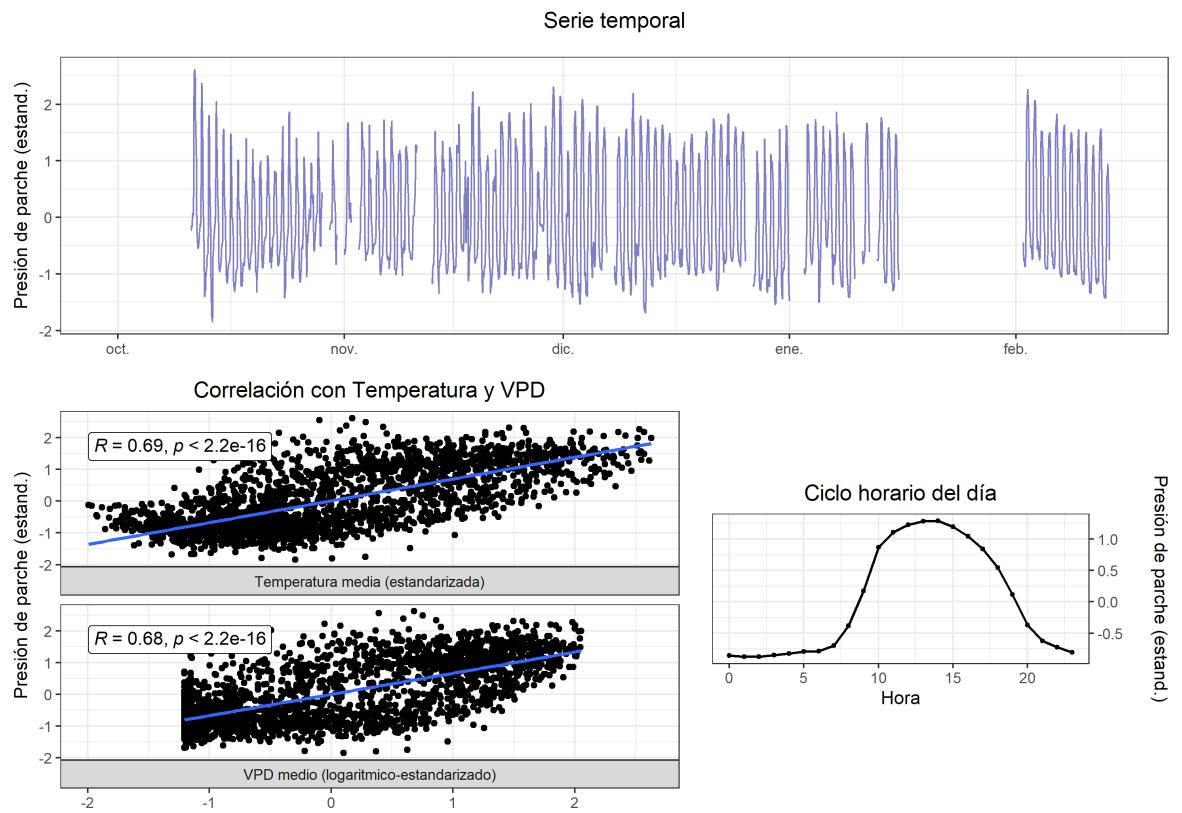
109 T4 (2023-2024)



Unidad 1

Unidad 2

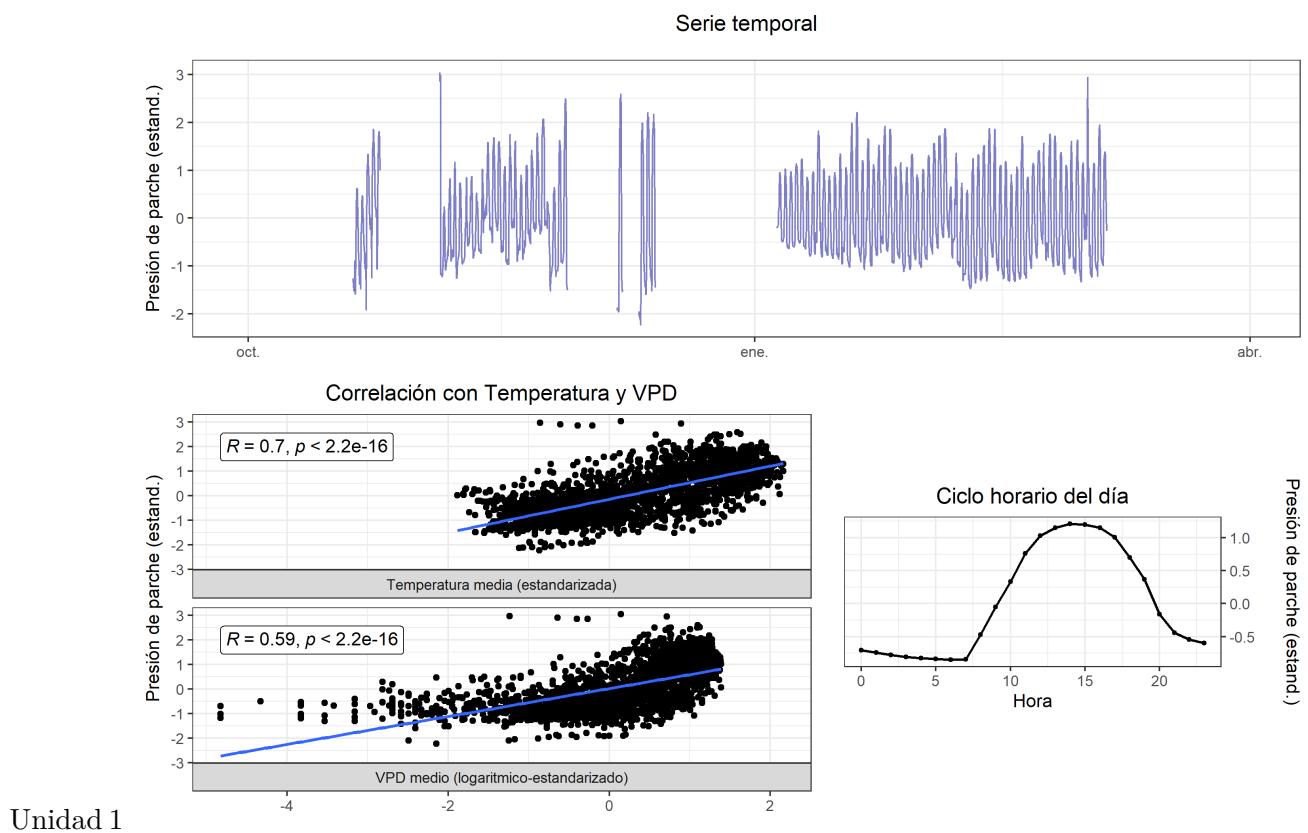


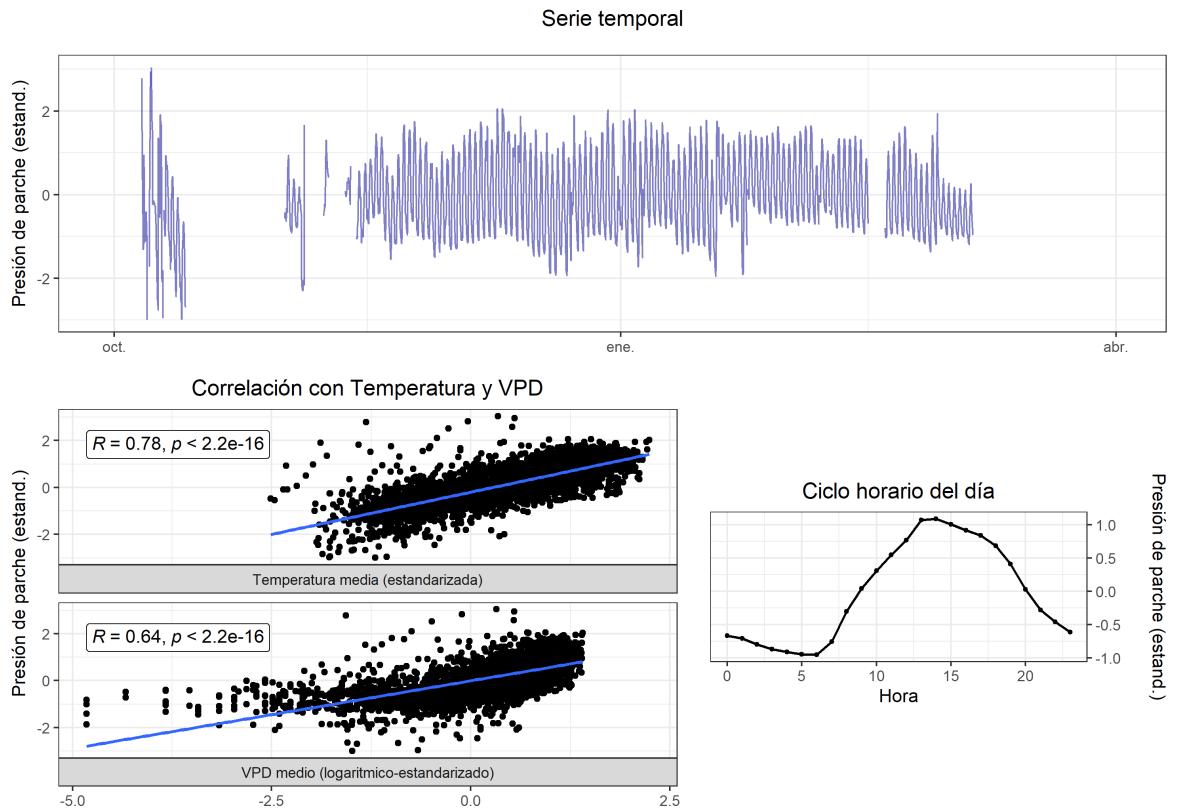


Unidad 3

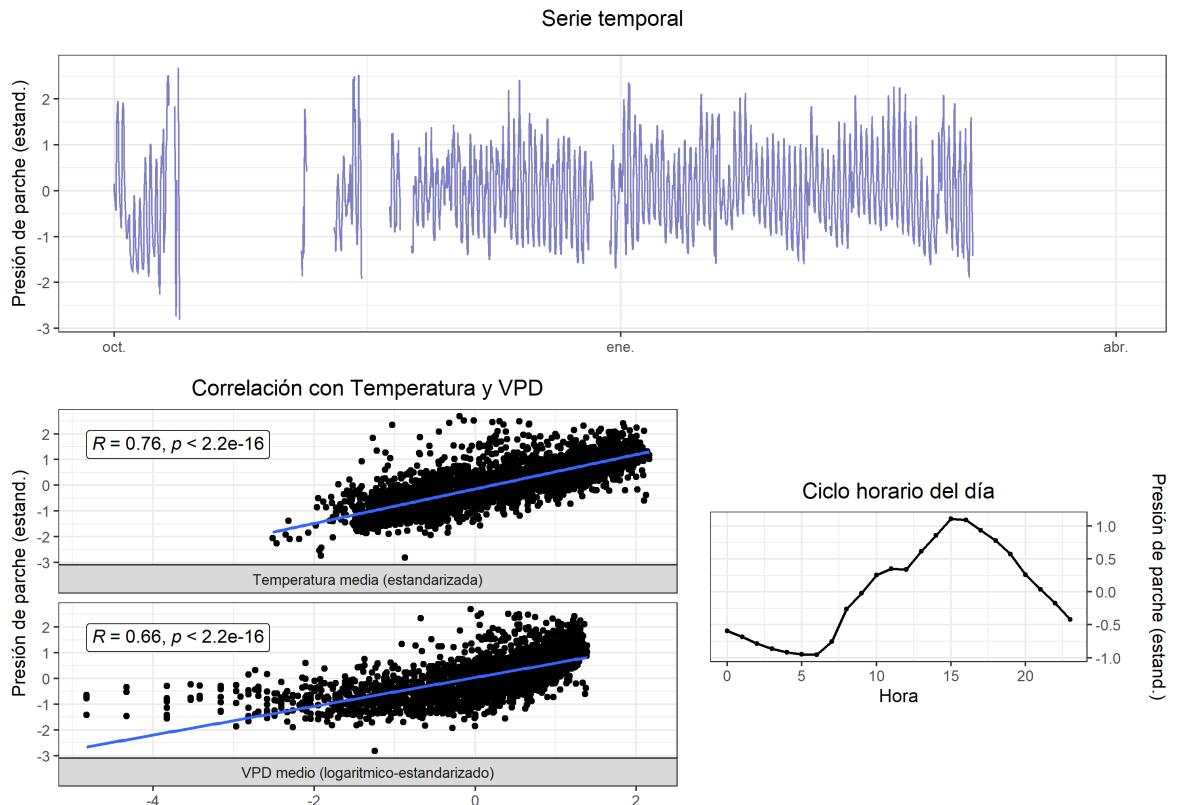
109.0.1 Rio Claro

110 T1 (2022-2023)



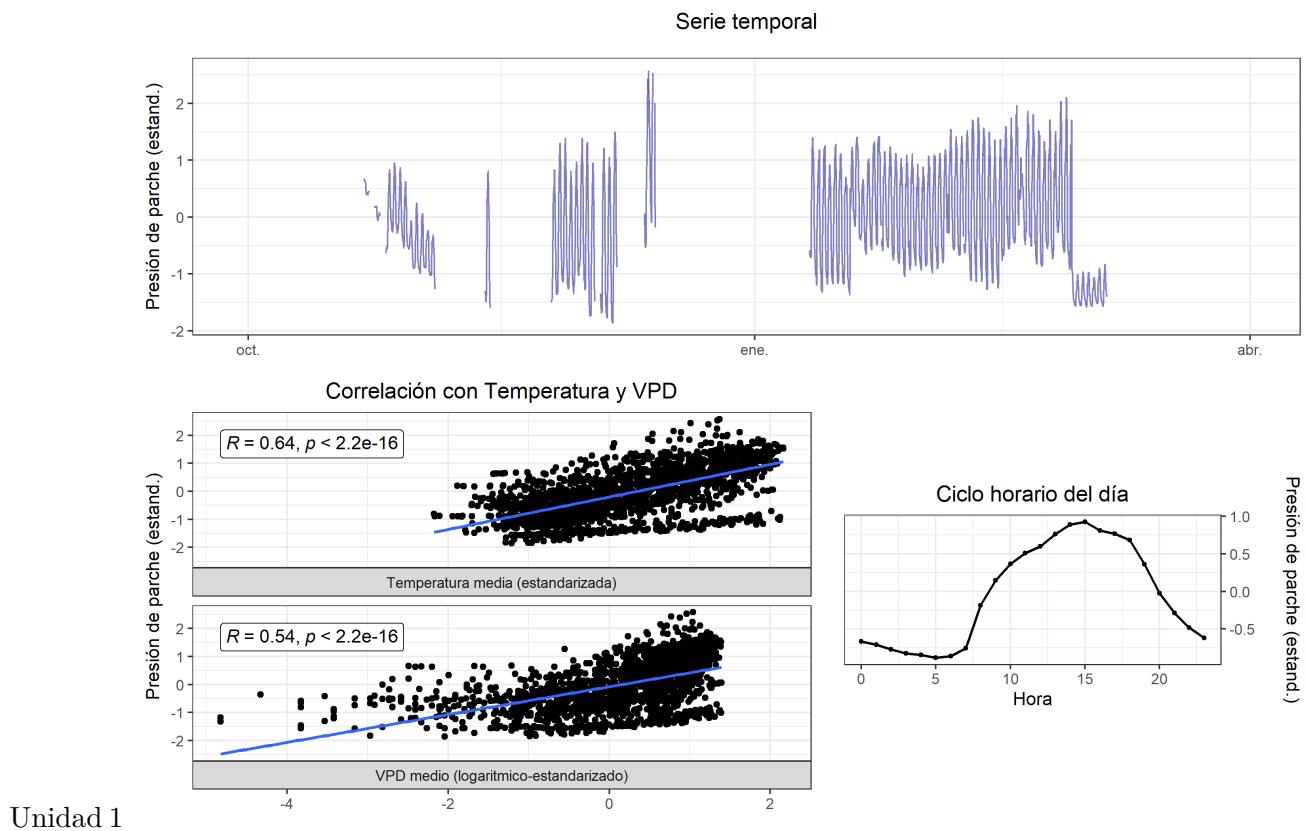


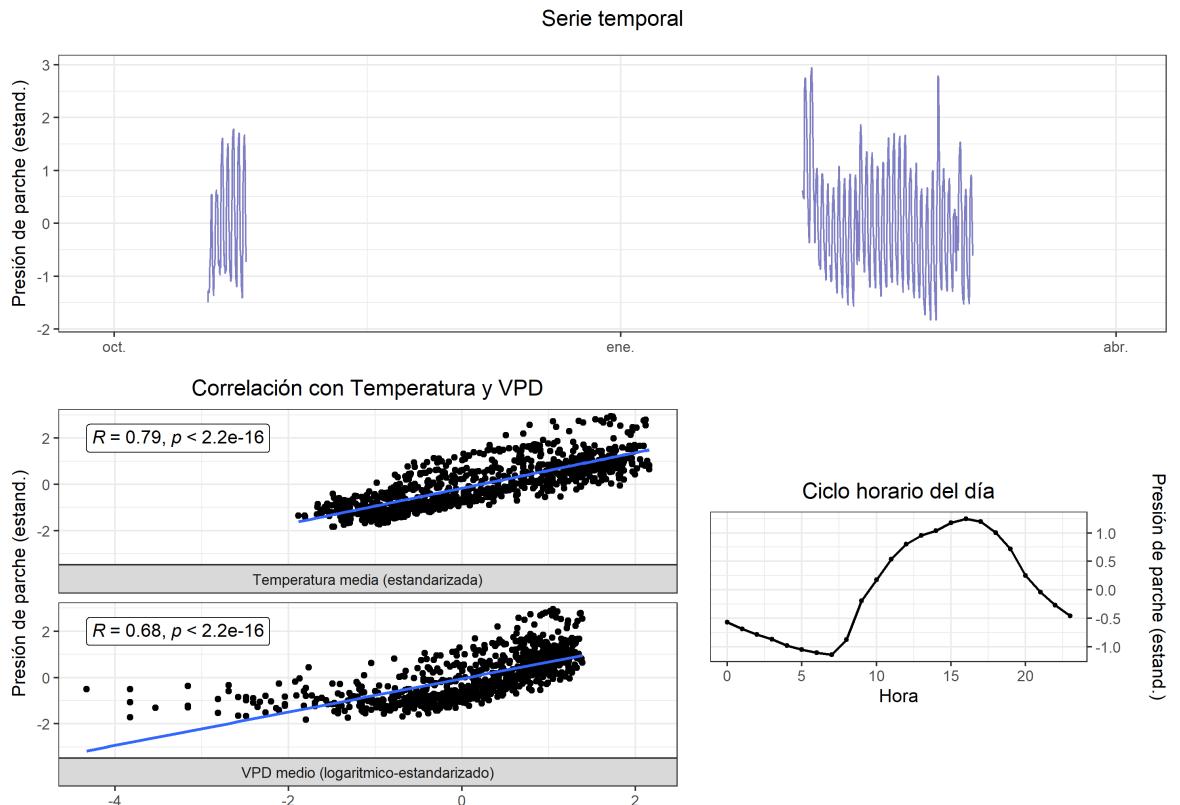
Unidad 2



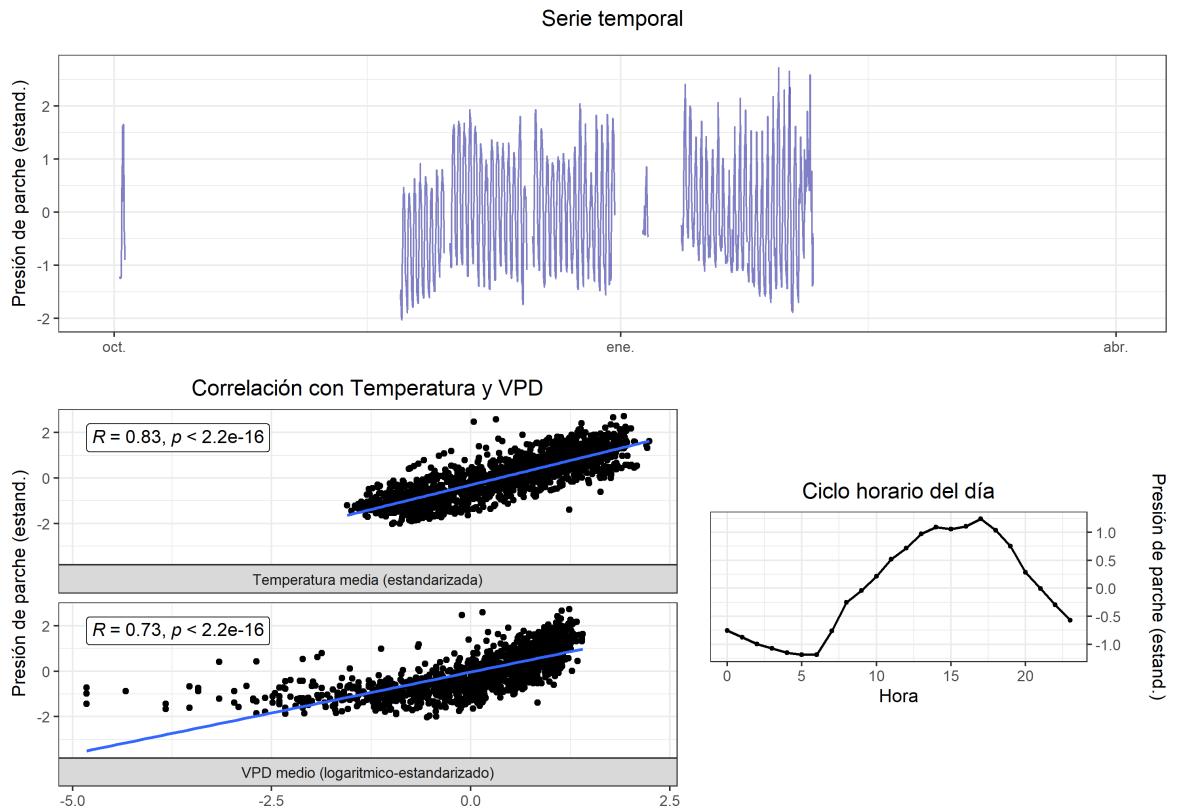
Unidad 3

111 T2 (2022-2023)



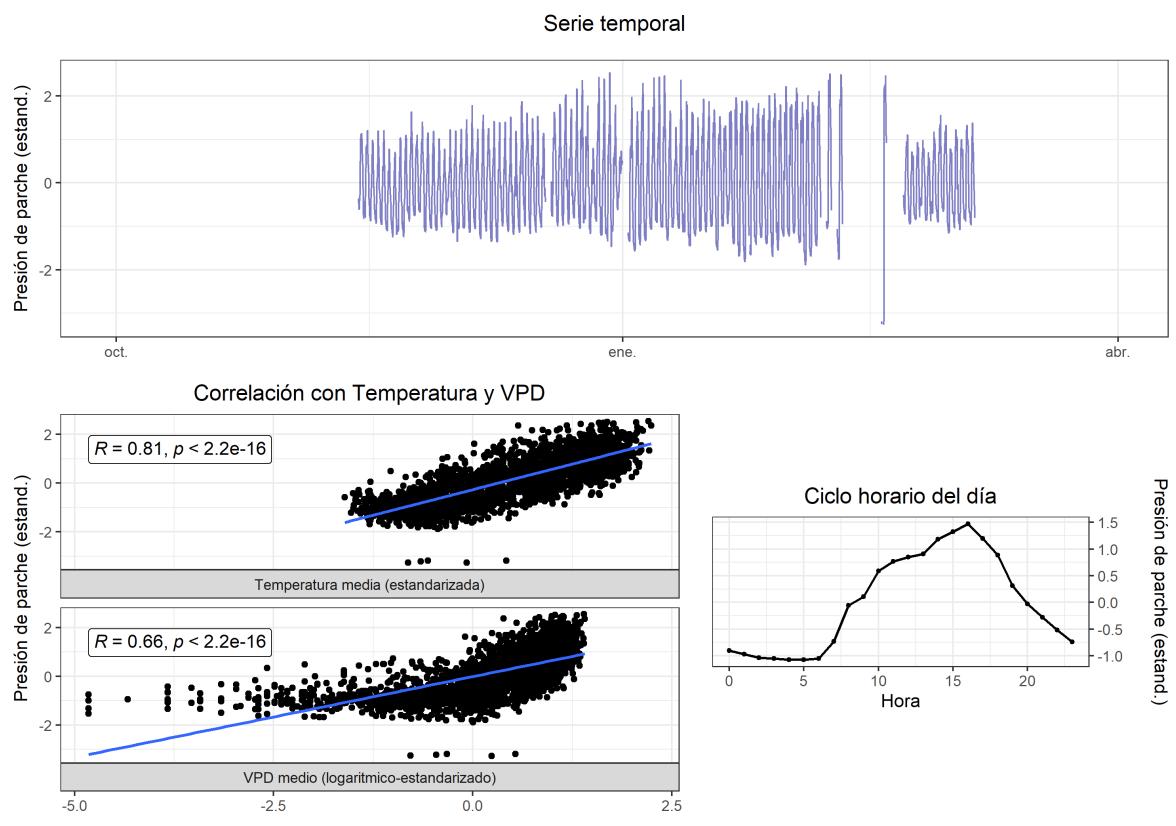


Unidad 2

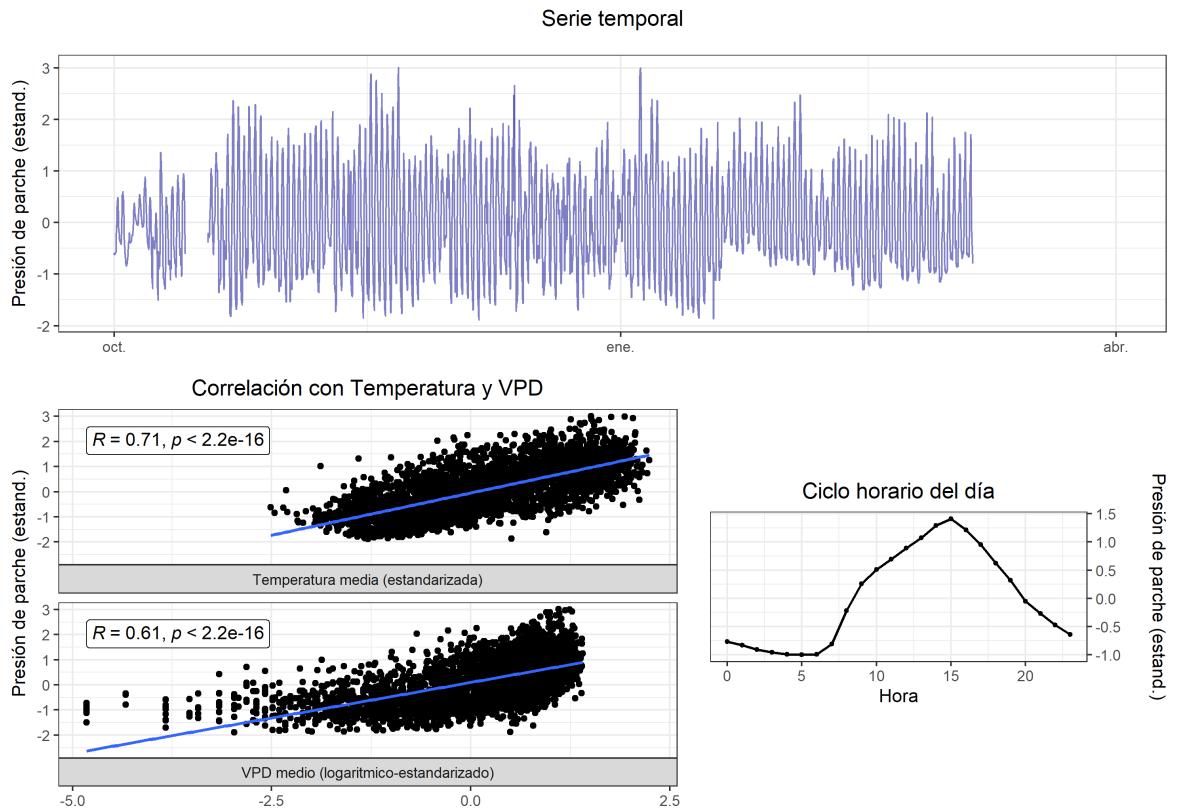


Unidad 3

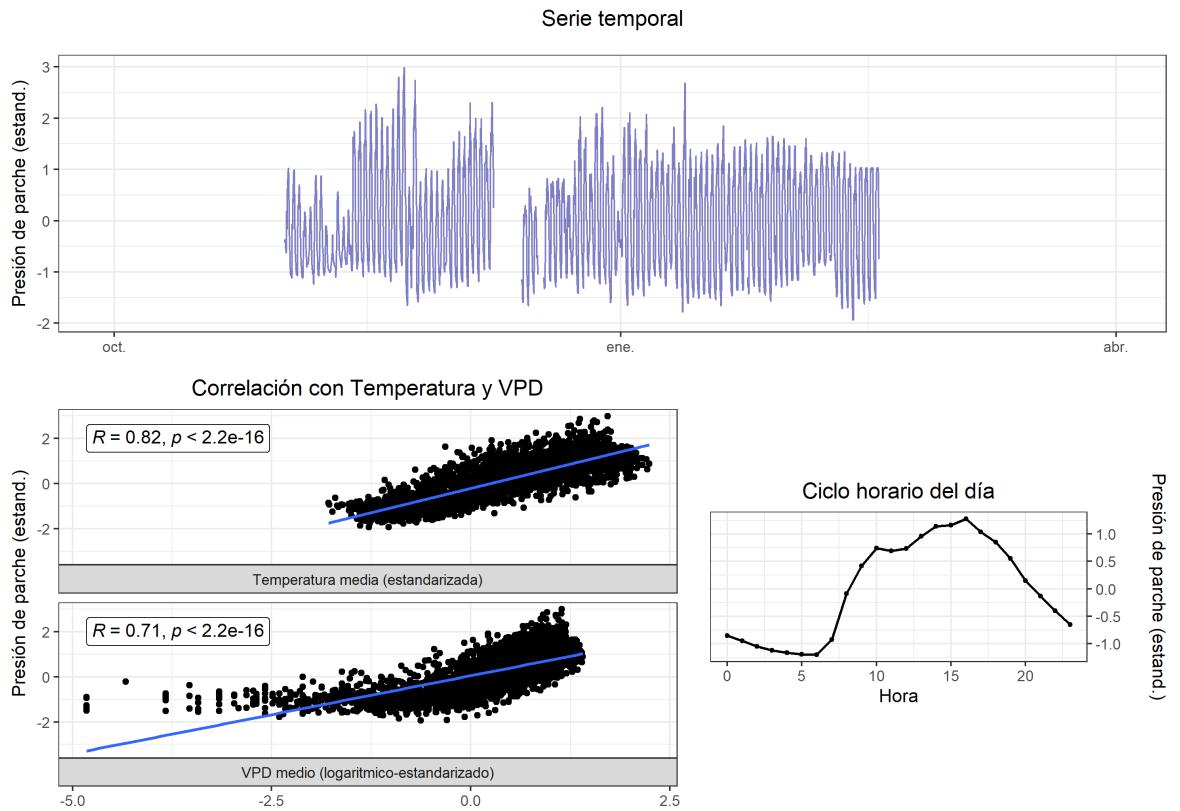
112 T3 (2022-2023)



Unidad 1

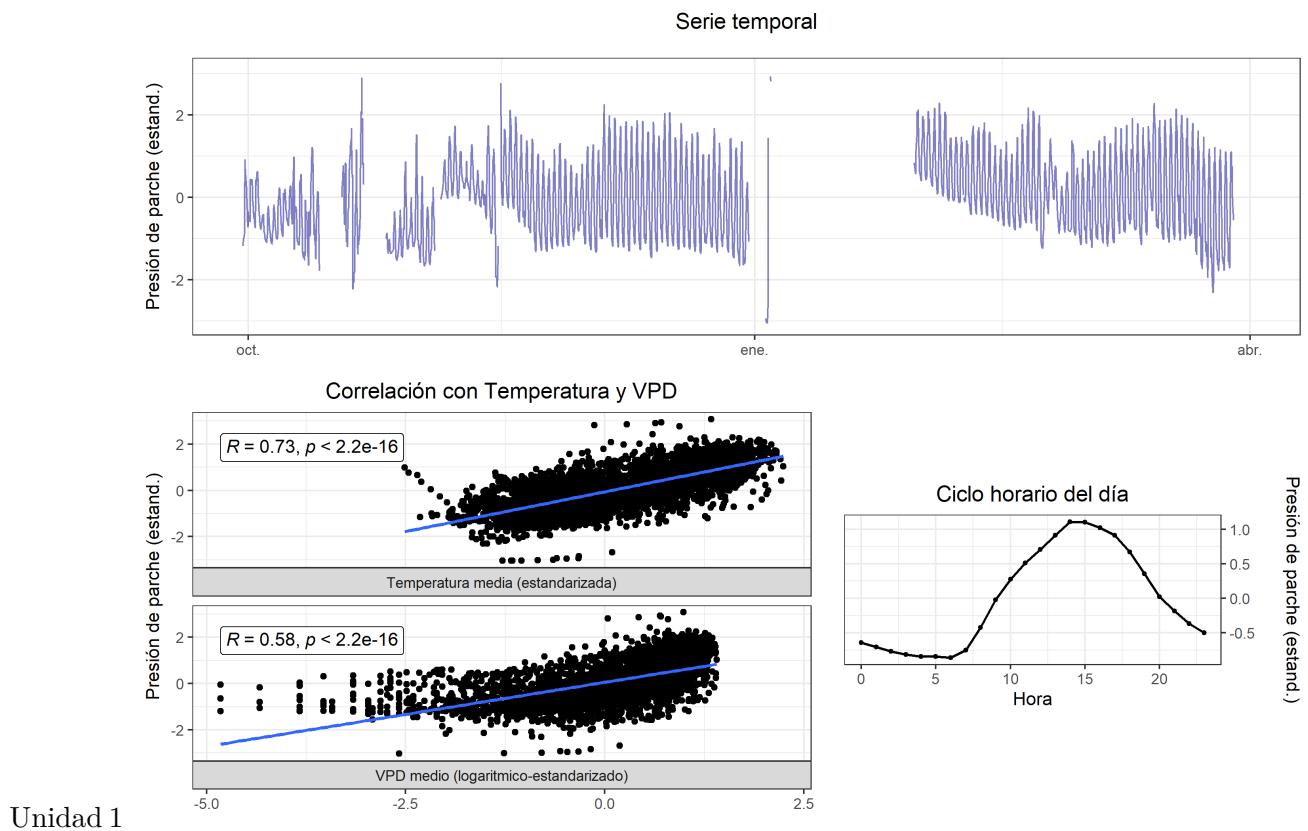


Unidad 2

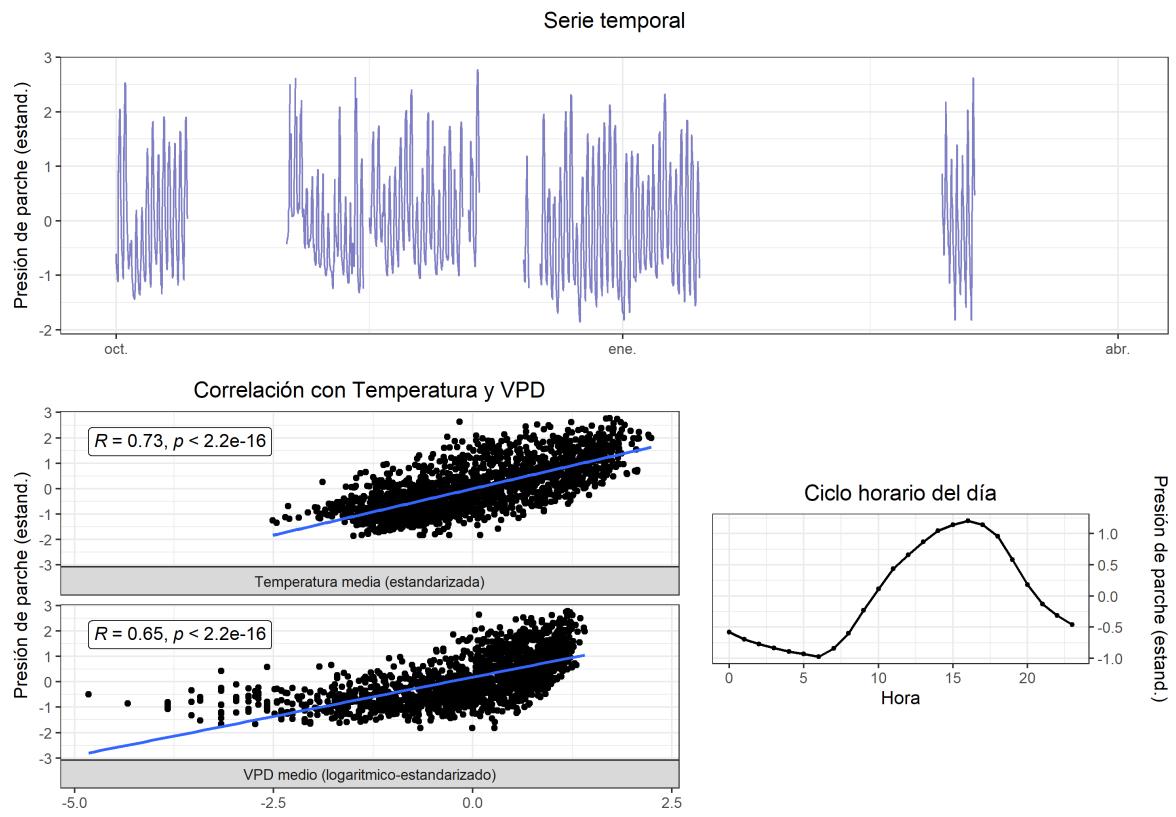


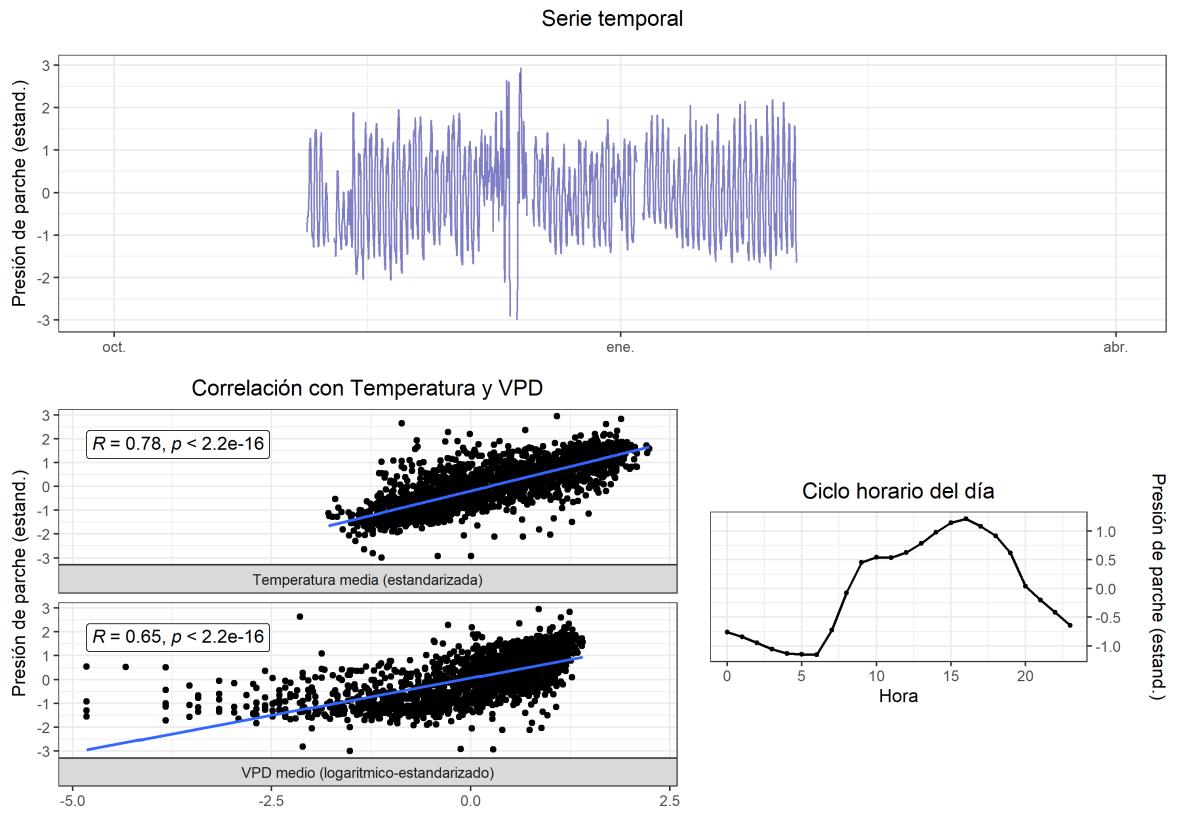
Unidad 3

113 T4 (2022-2023)



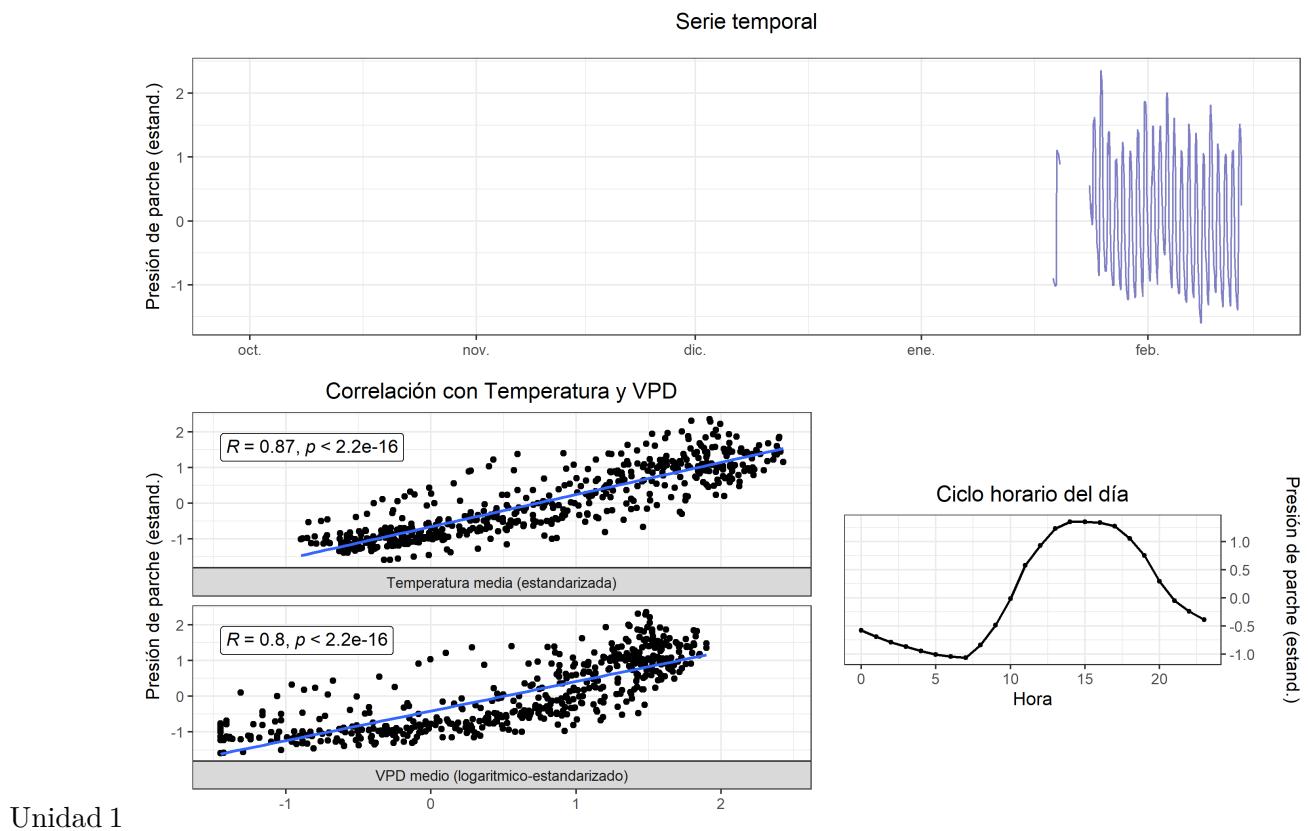
Unidad 2

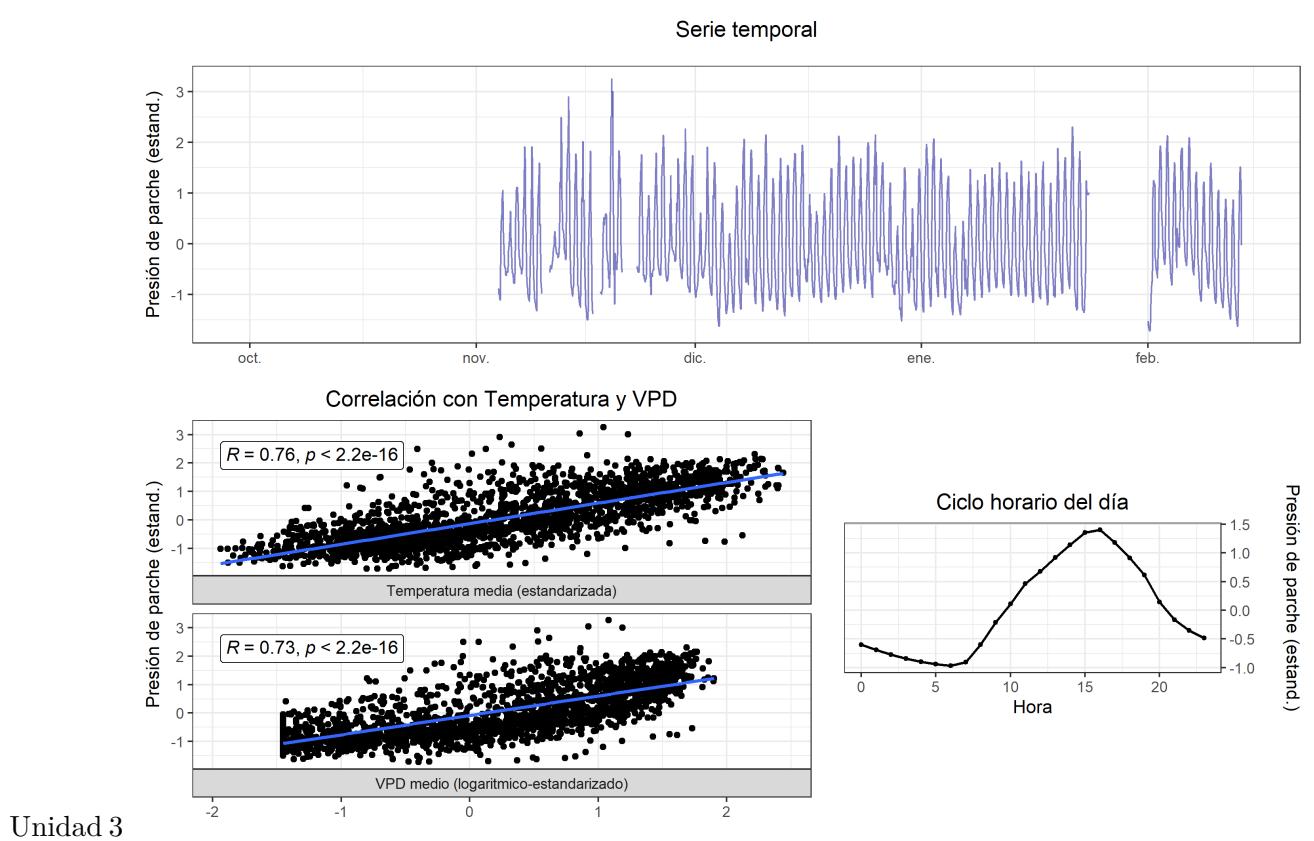




Unidad 3

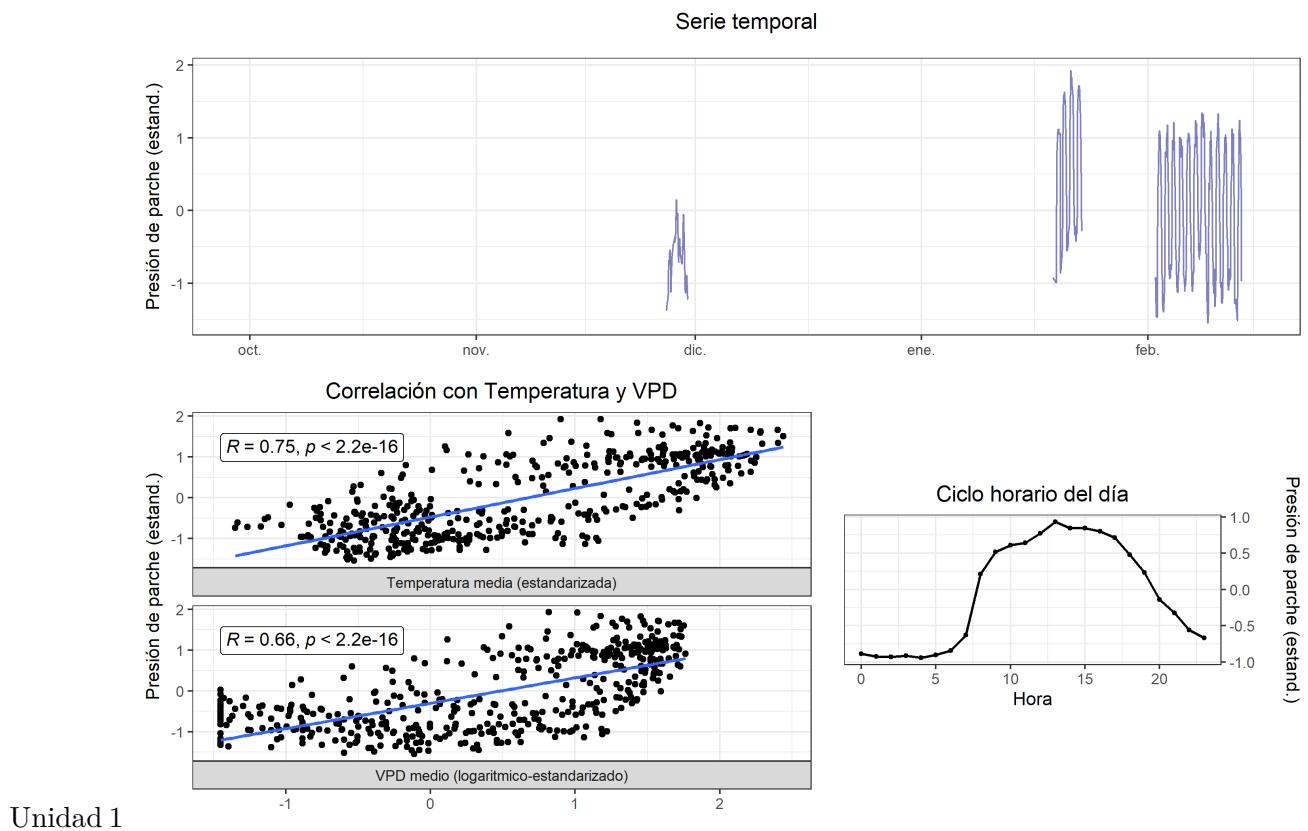
114 T1 (2023-2024)

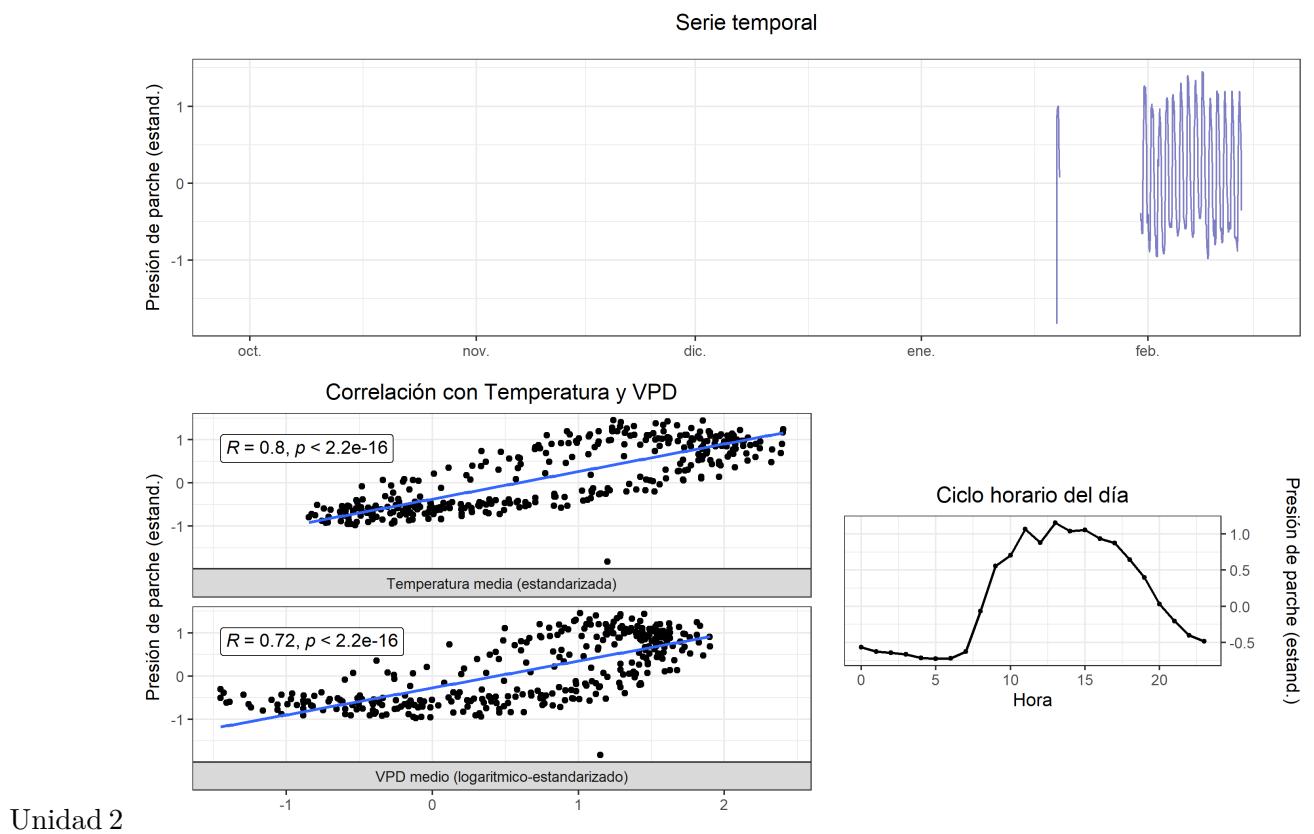




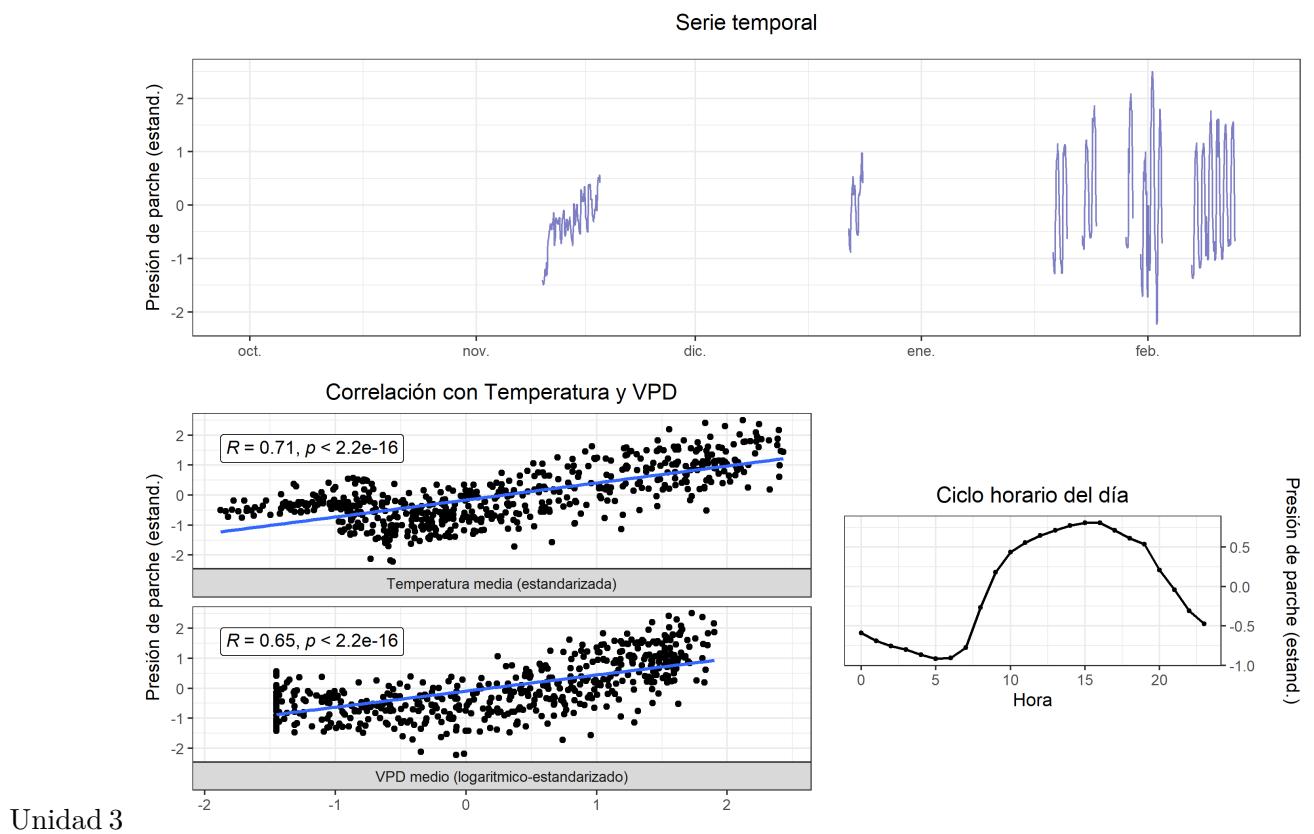
Unidad 3

115 T2 (2023-2024)

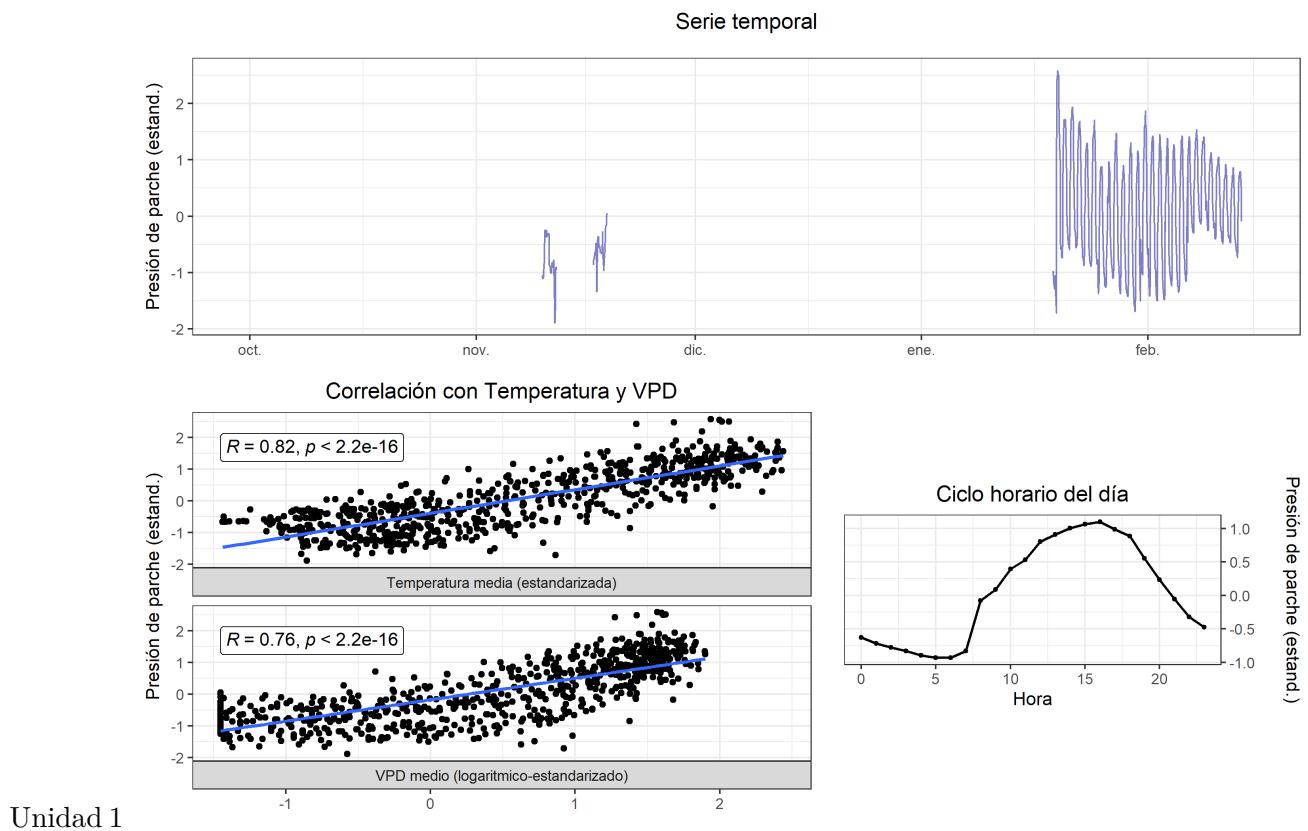


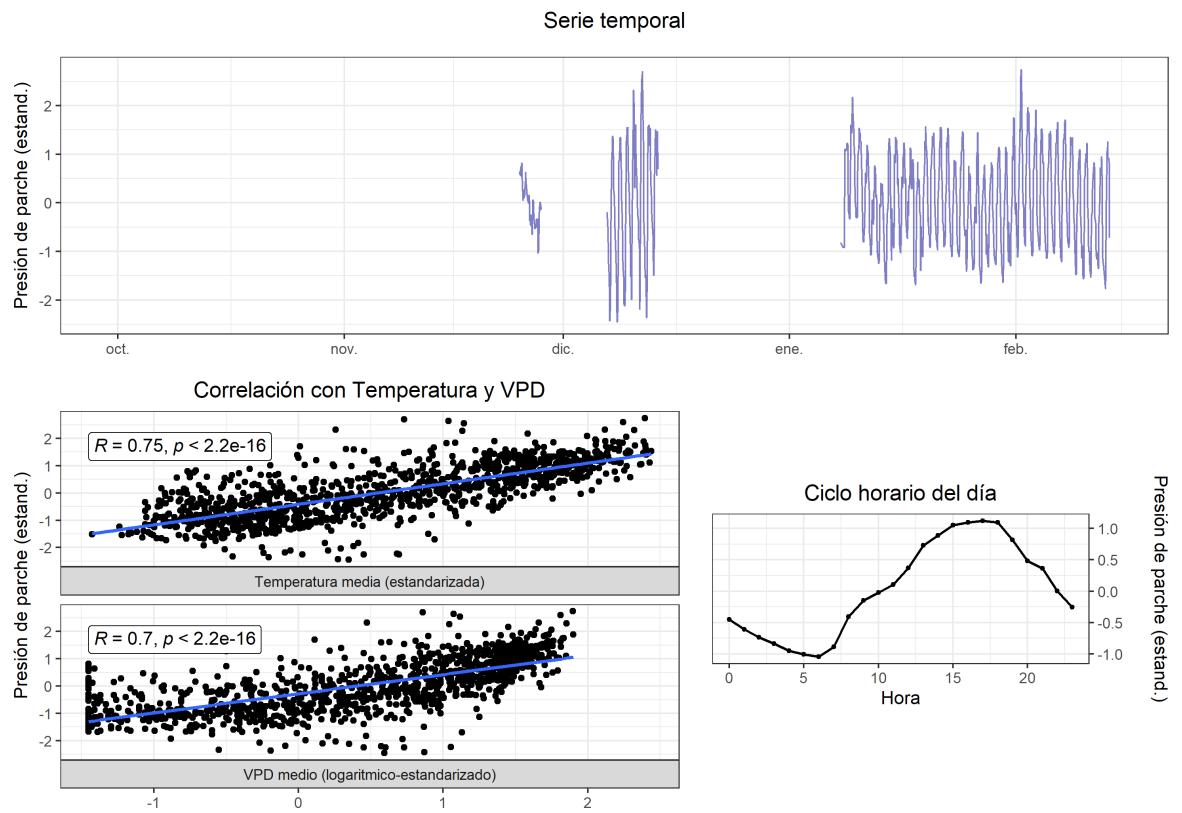


Unidad 2



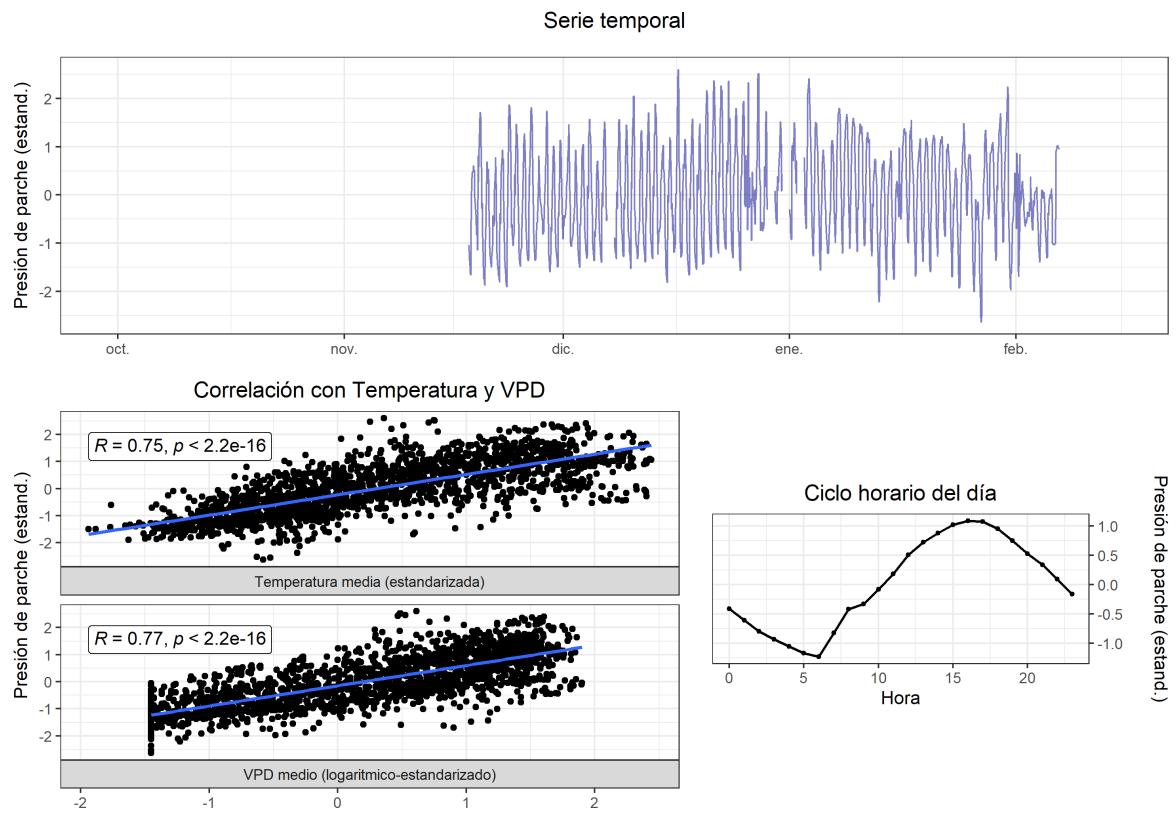
116 T3 (2023-2024)



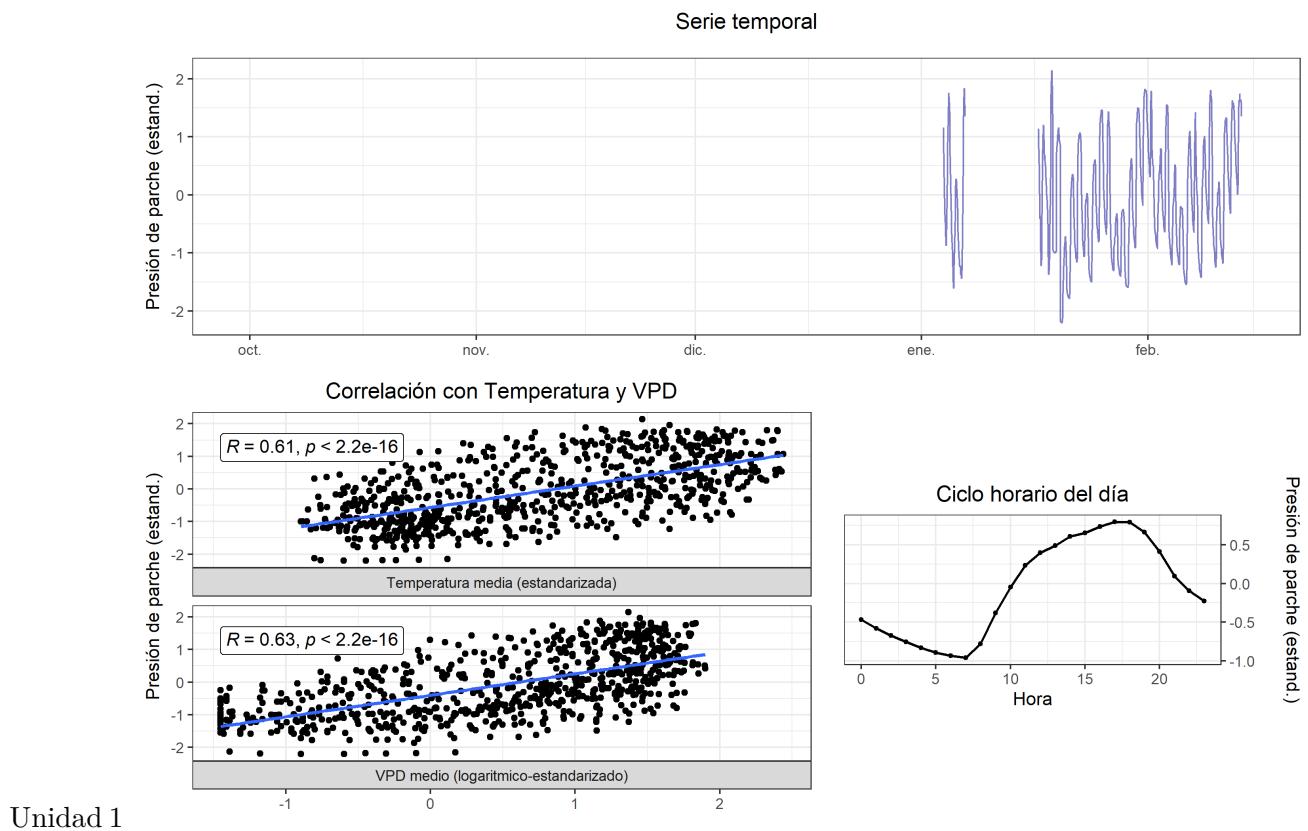


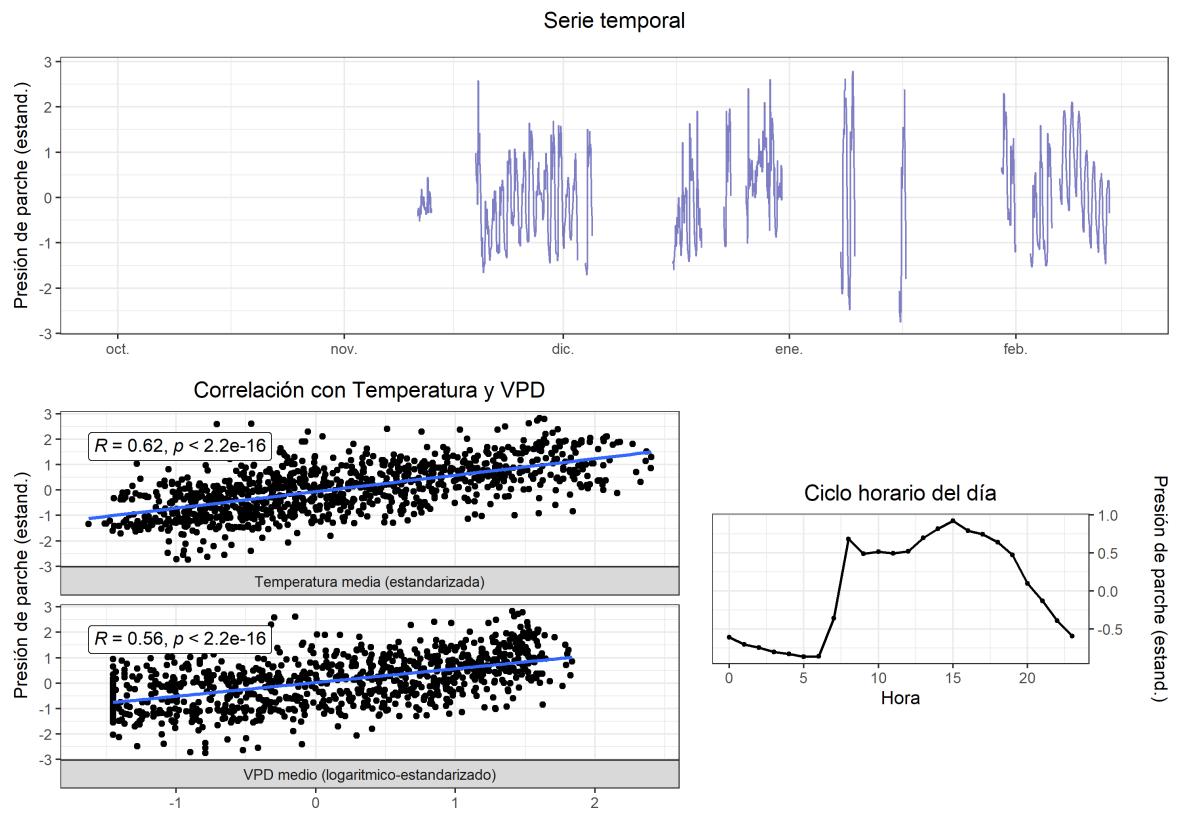
Unidad 2

Unidad 3

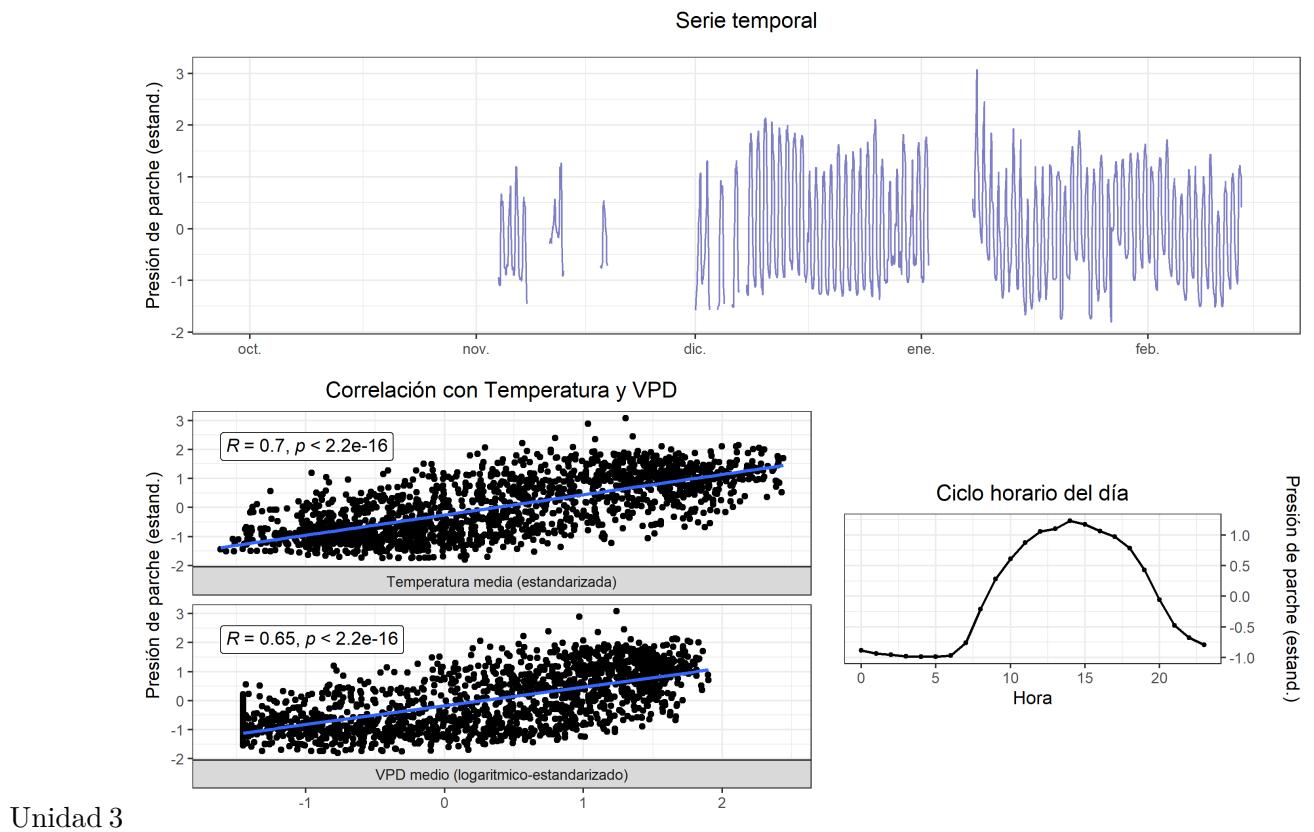


117 T4 (2023-2024)





Unidad 2

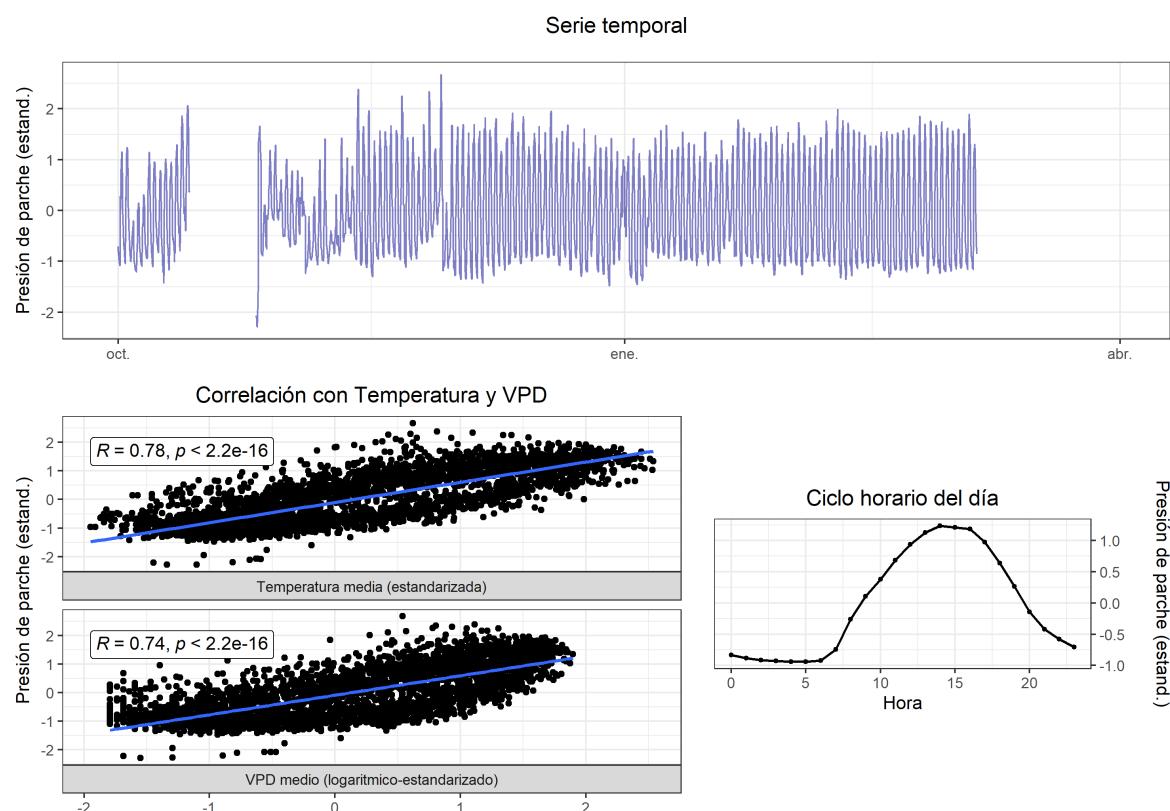


117.1 A nivel de tratamiento

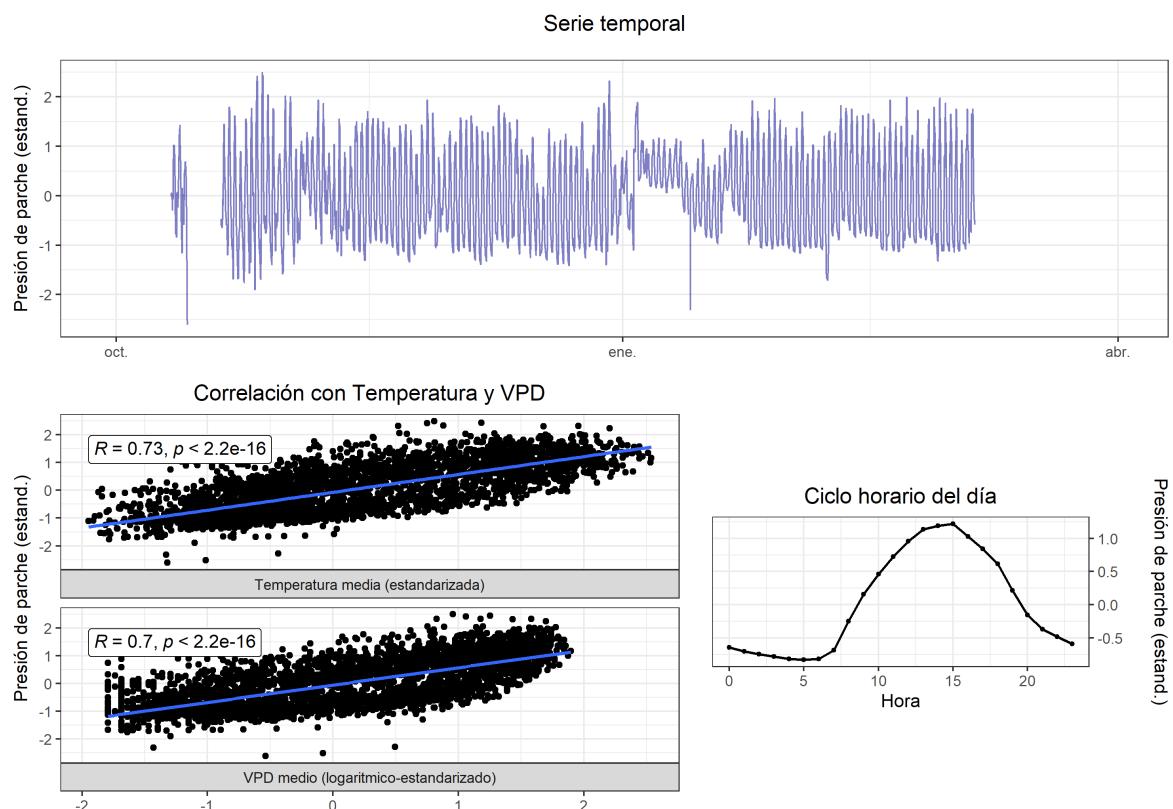
Para obtener el turgor preprocesado a nivel de tratamiento, se promediaron las series promediadas de cada unidad según tratamiento, obteniendo una serie única para cada tratamiento de en ambos sitios.

117.1.1 La Esperanza

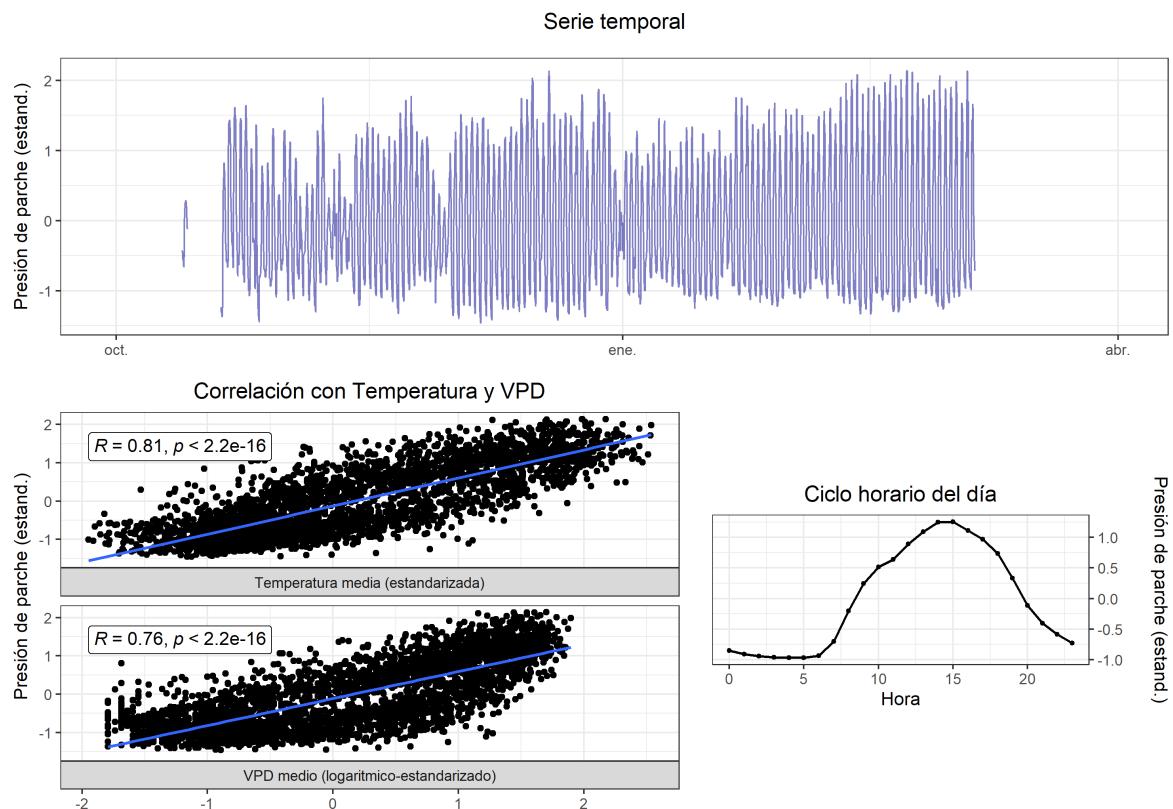
118 T1 (2022-2023)



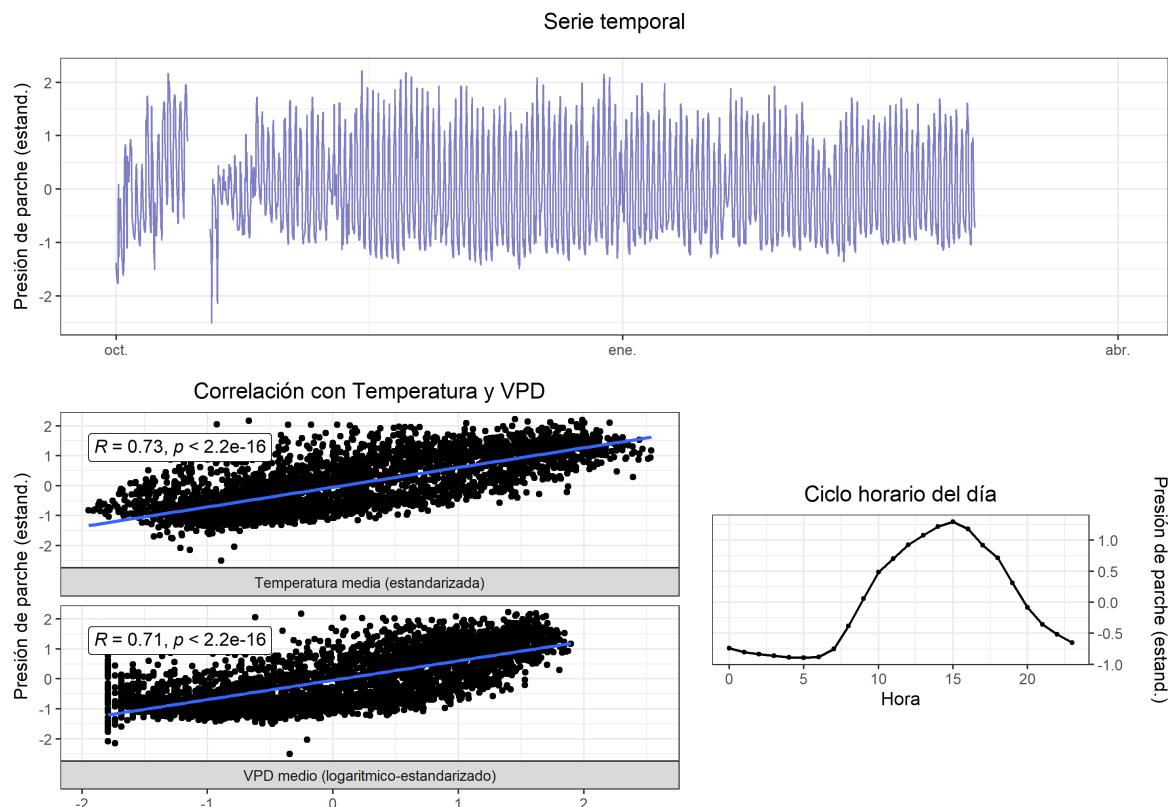
119 T2 (2022-2023)



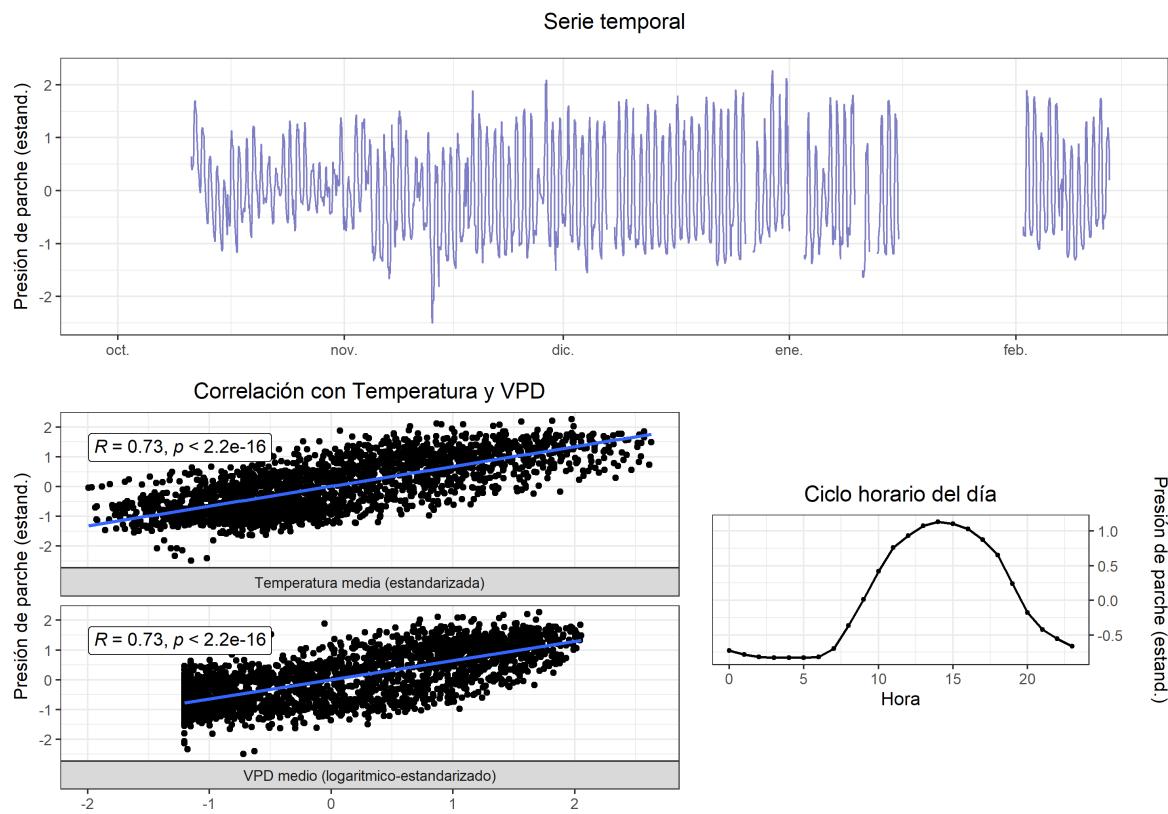
120 T3 (2022-2023)



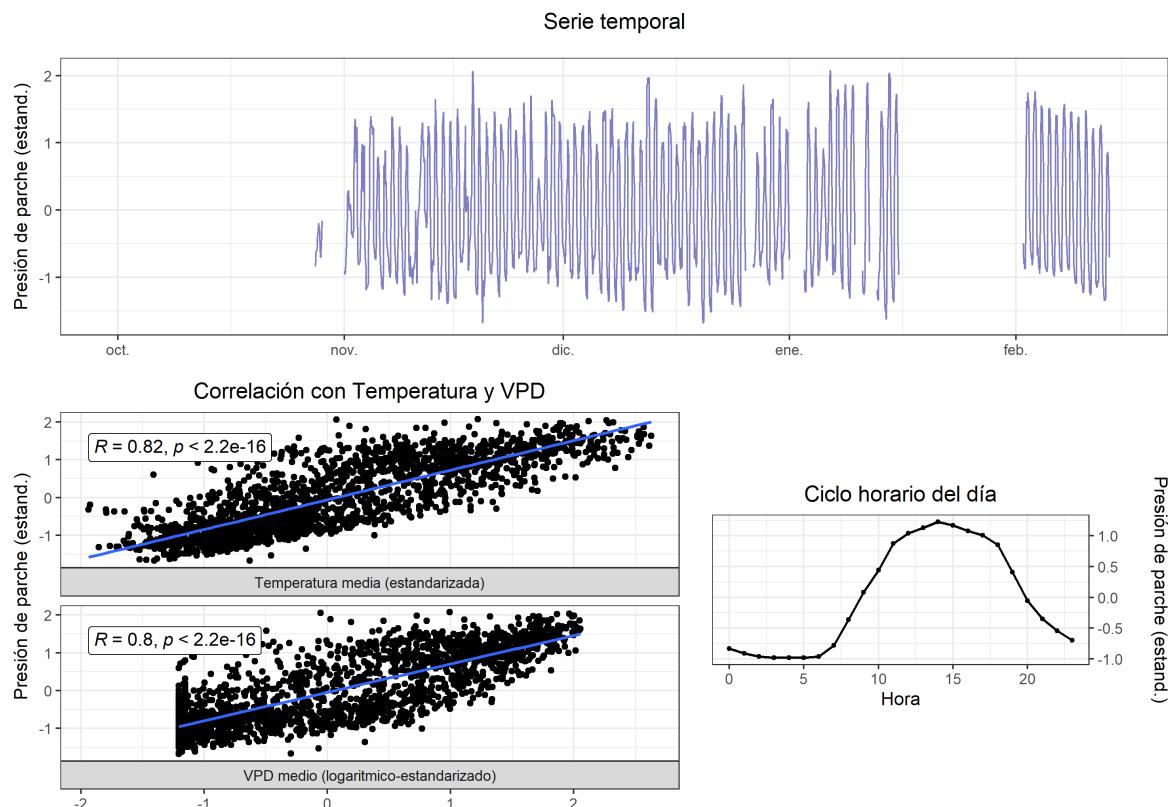
121 T4 (2022-2023)



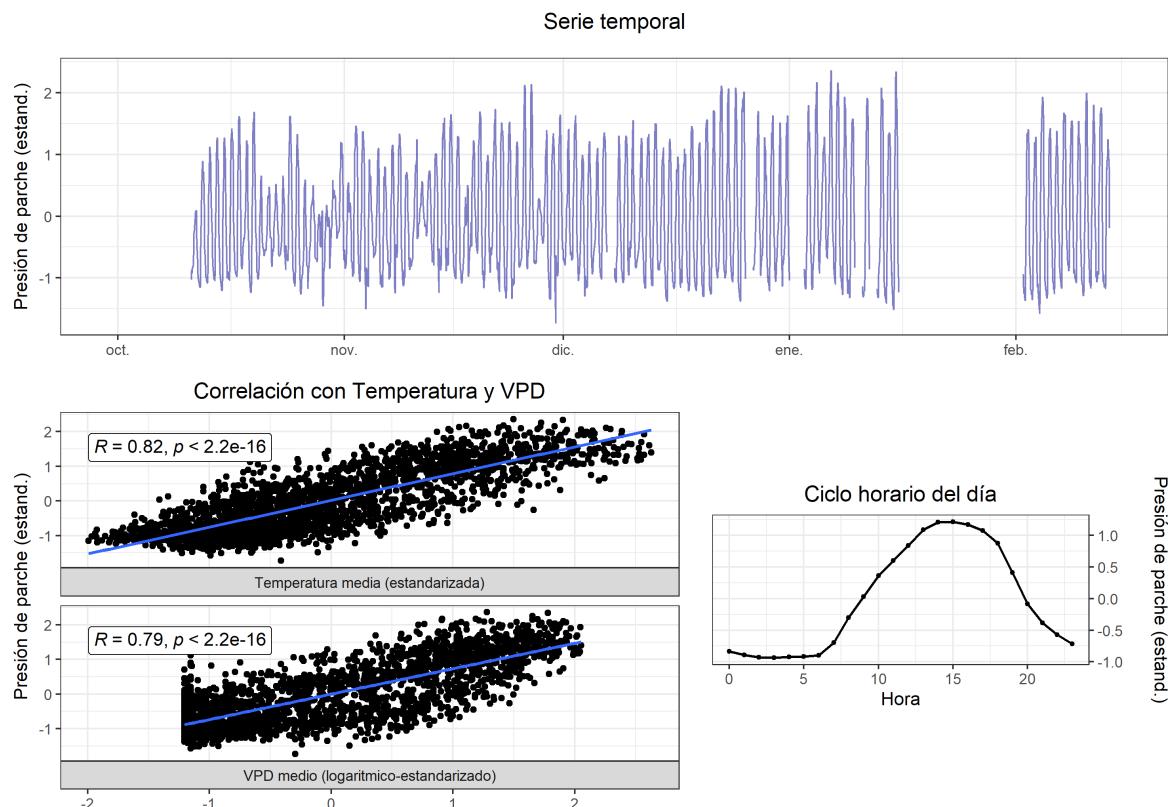
122 T1 (2023-2024)



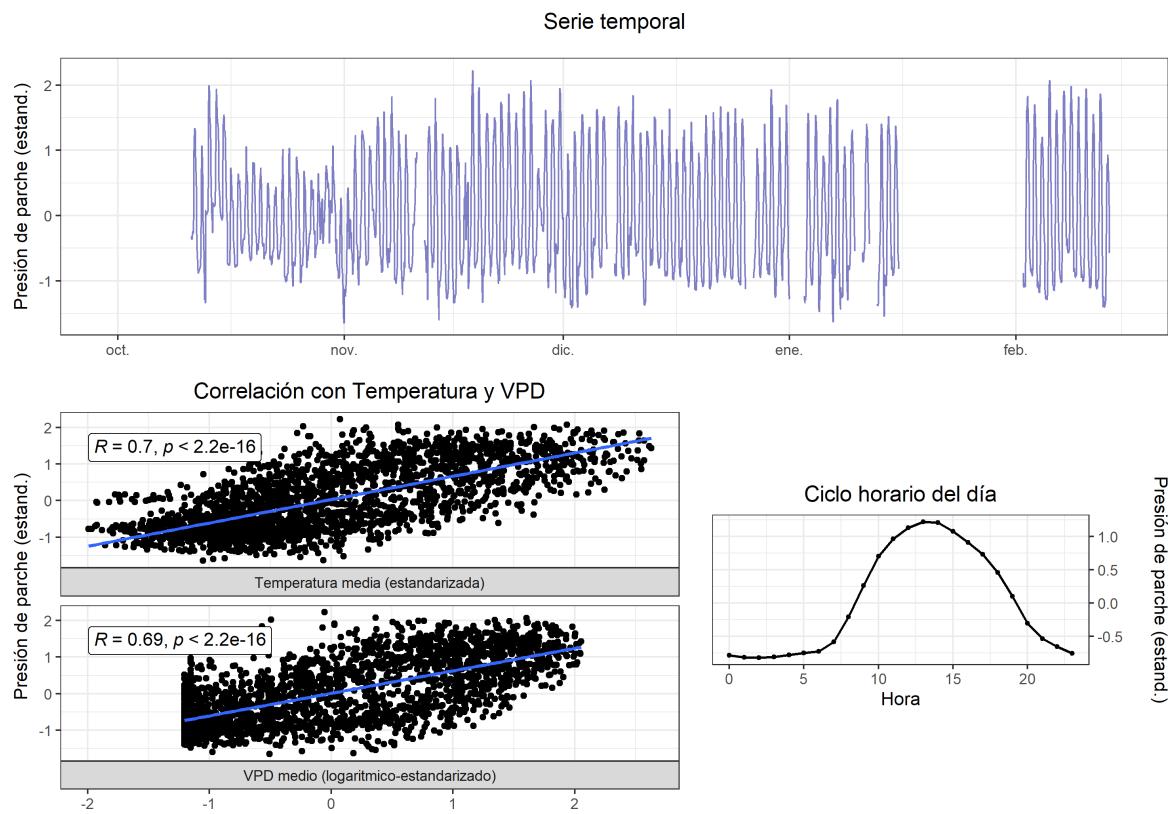
123 T2 (2023-2024)



124 T3 (2023-2024)

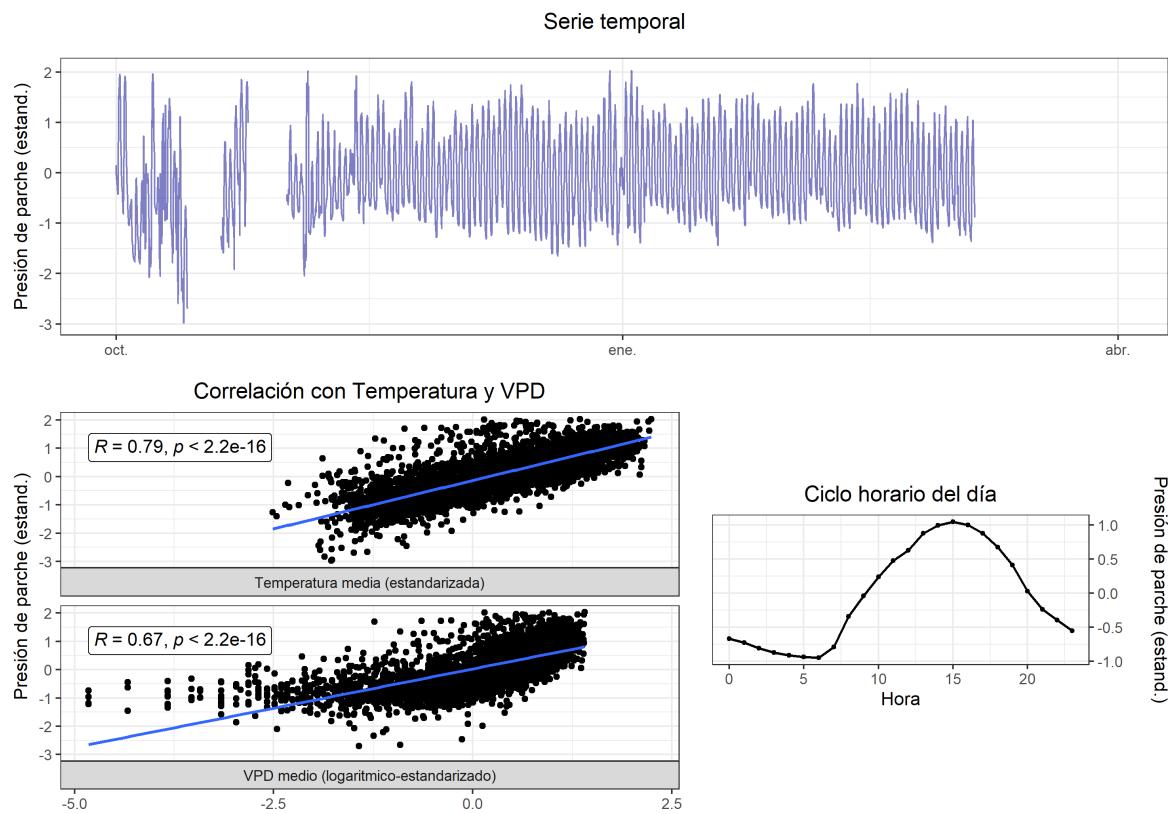


125 T4 (2023-2024)

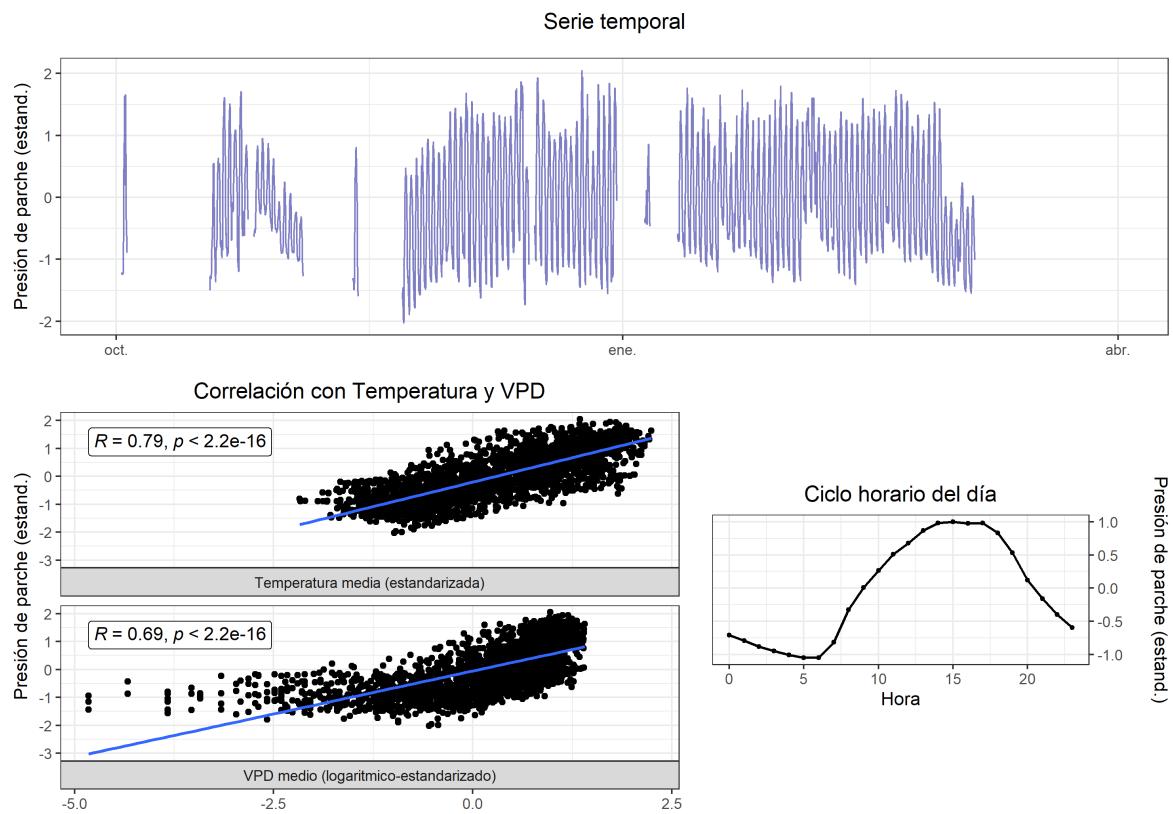


125.0.0.1 Rio Claro

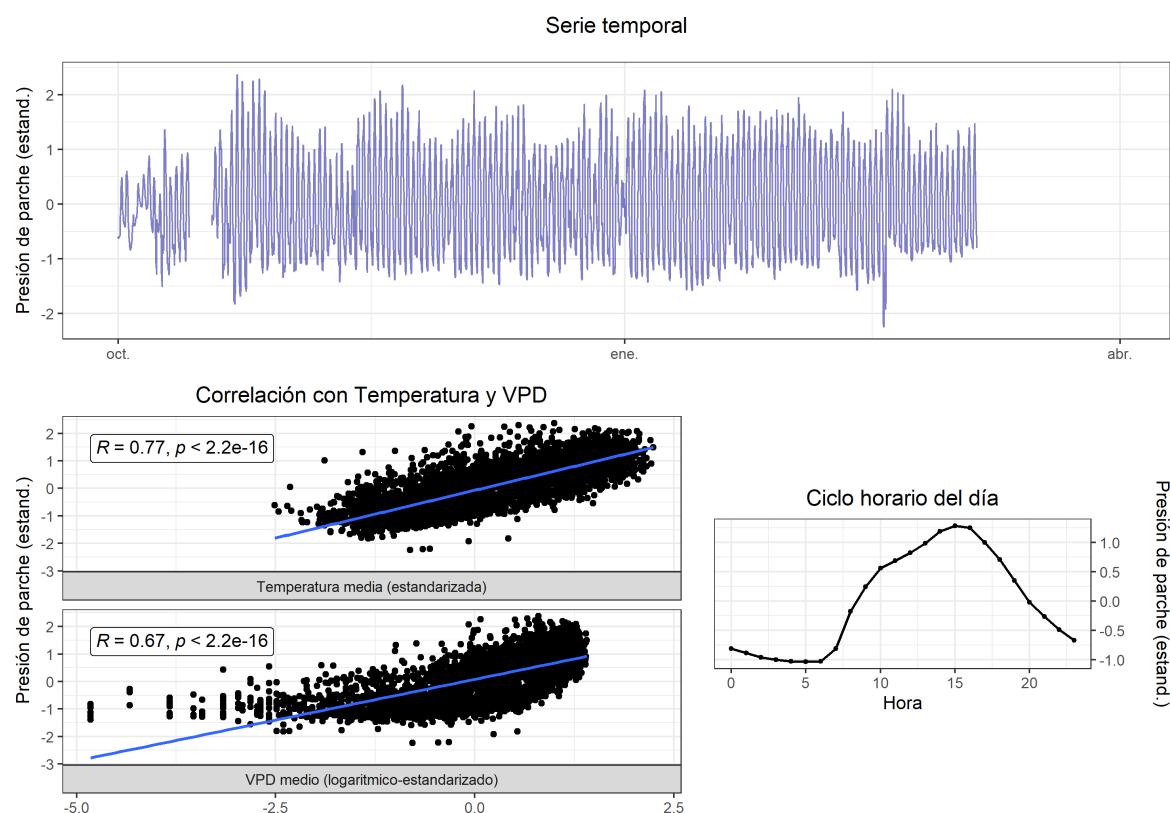
126 T1 (2022-2023)



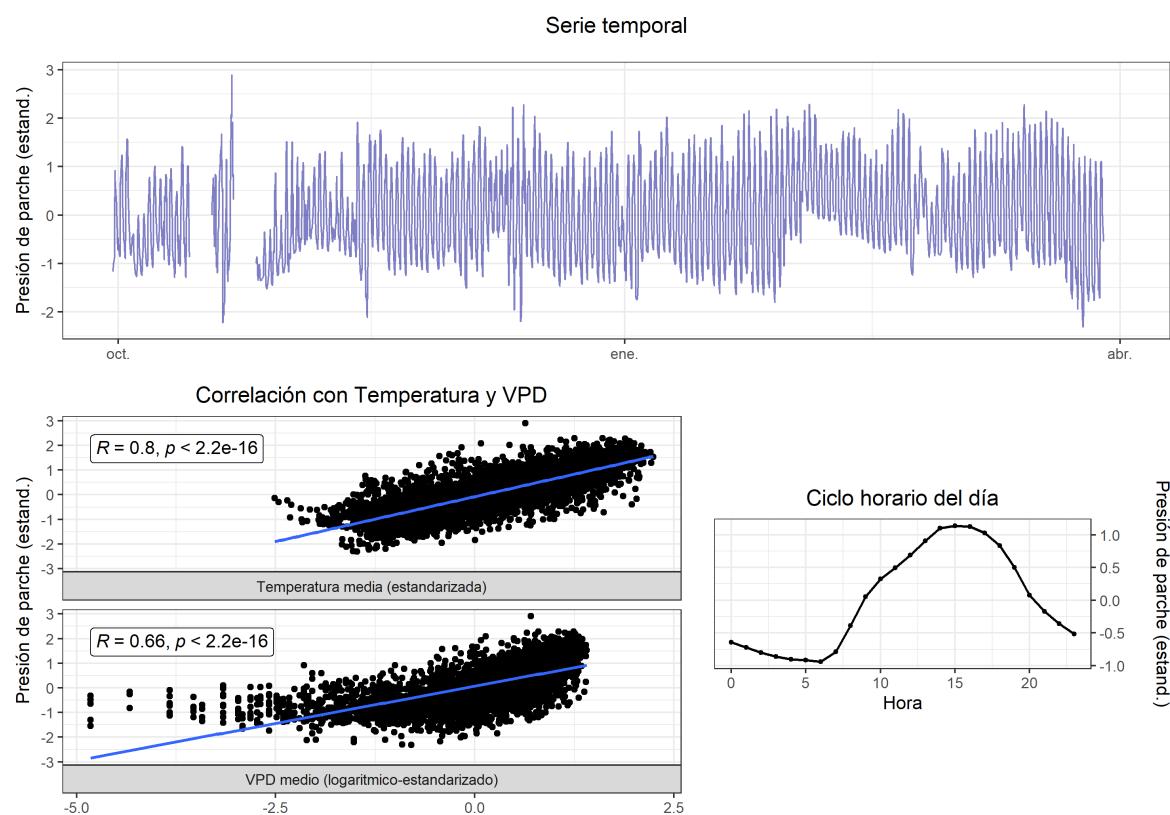
127 T2 (2022-2023)



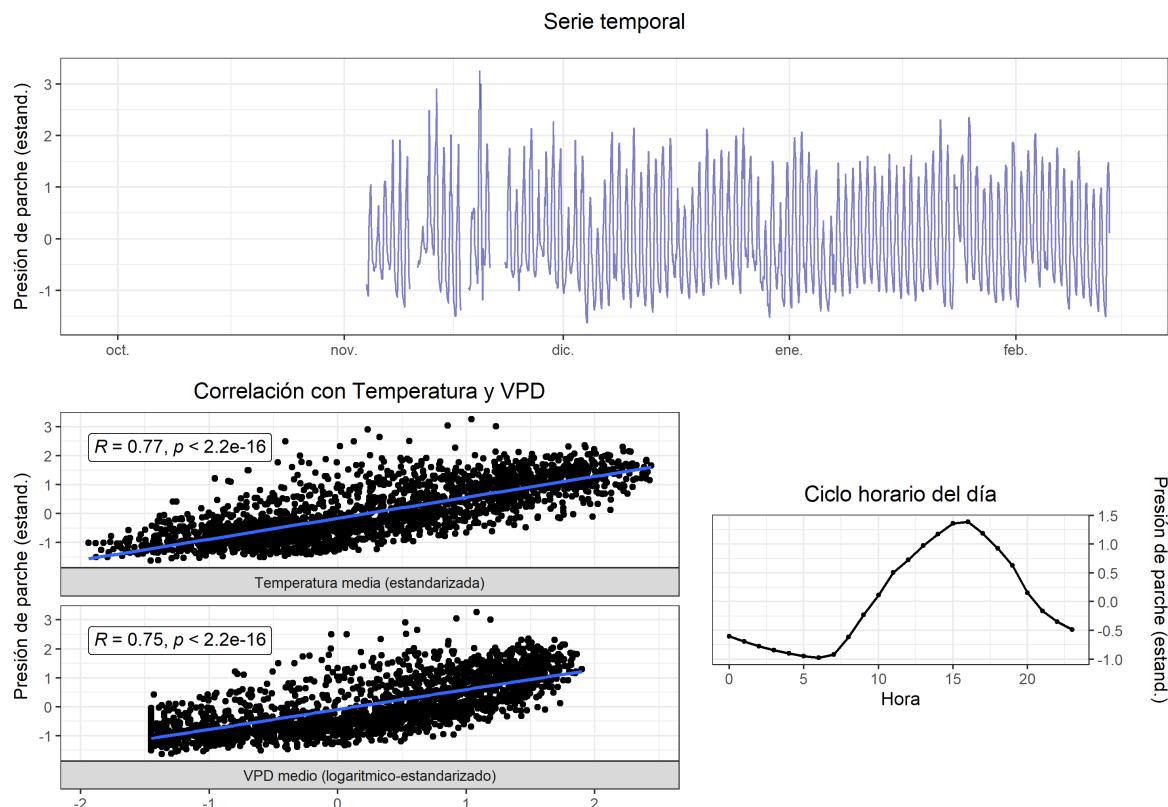
128 T3 (2022-2023)



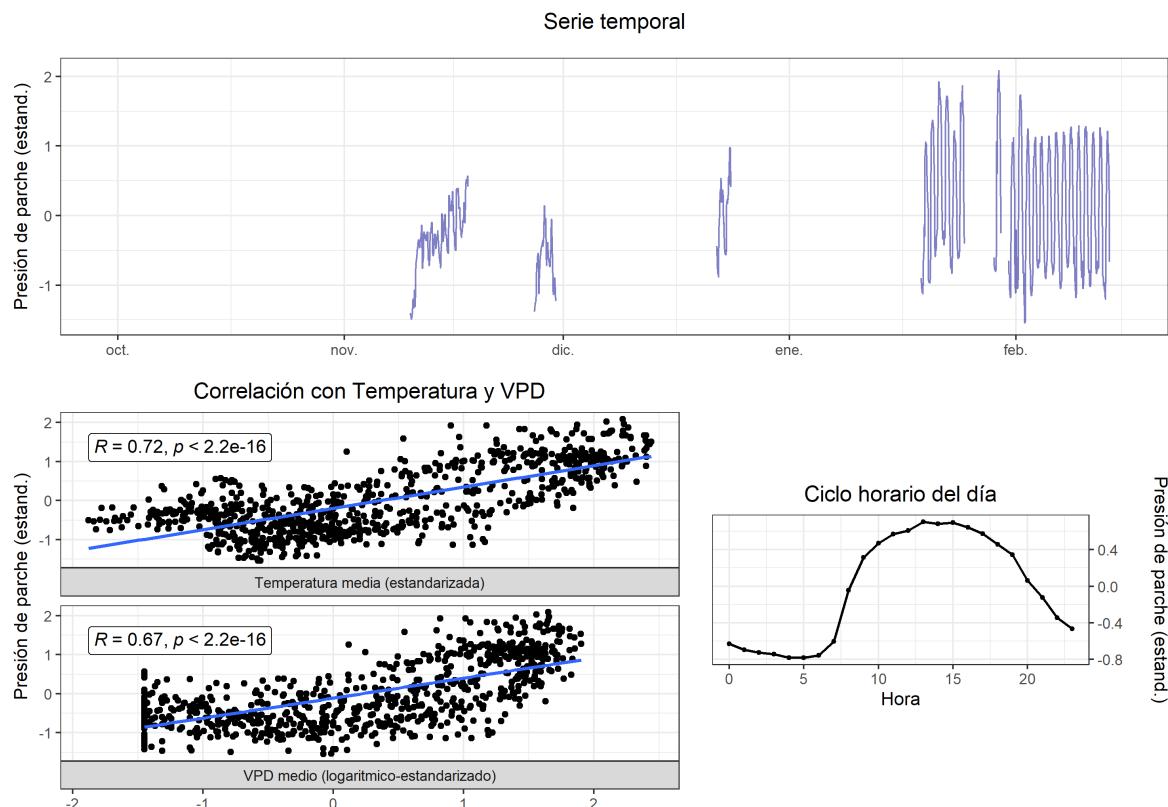
129 T4 (2022-2023)



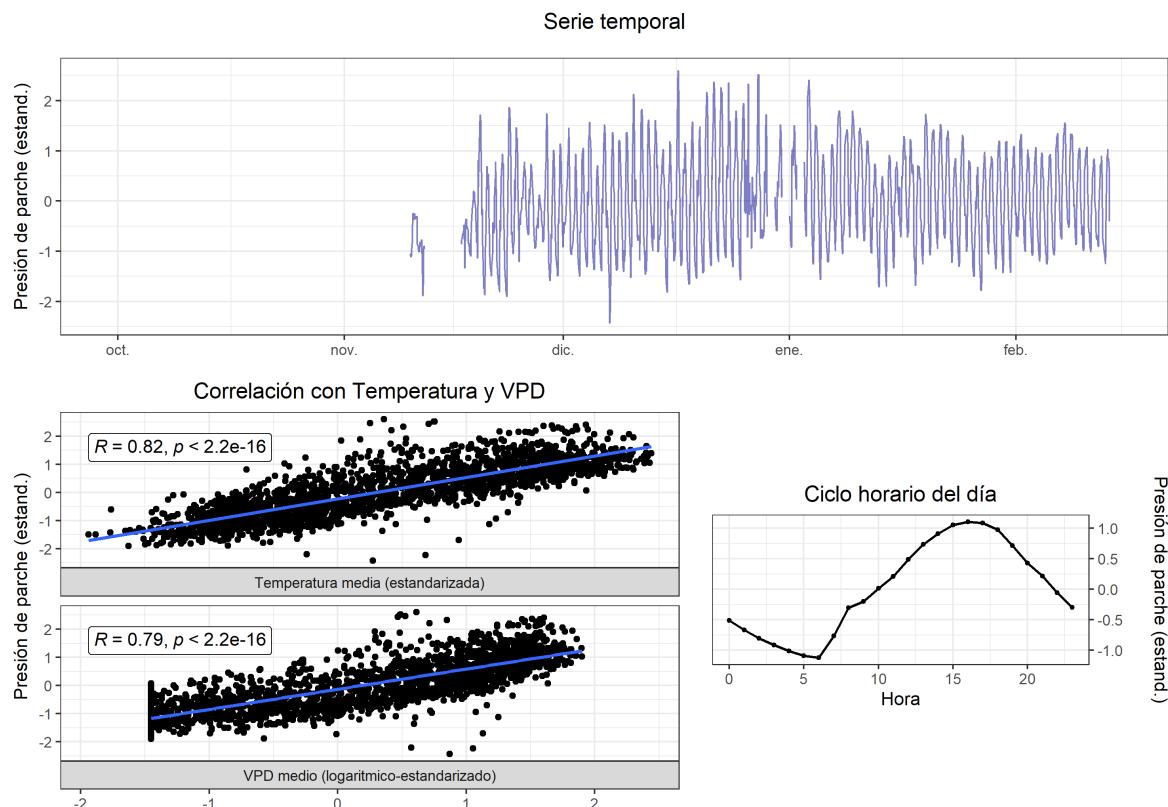
130 T1 (2023-2024)



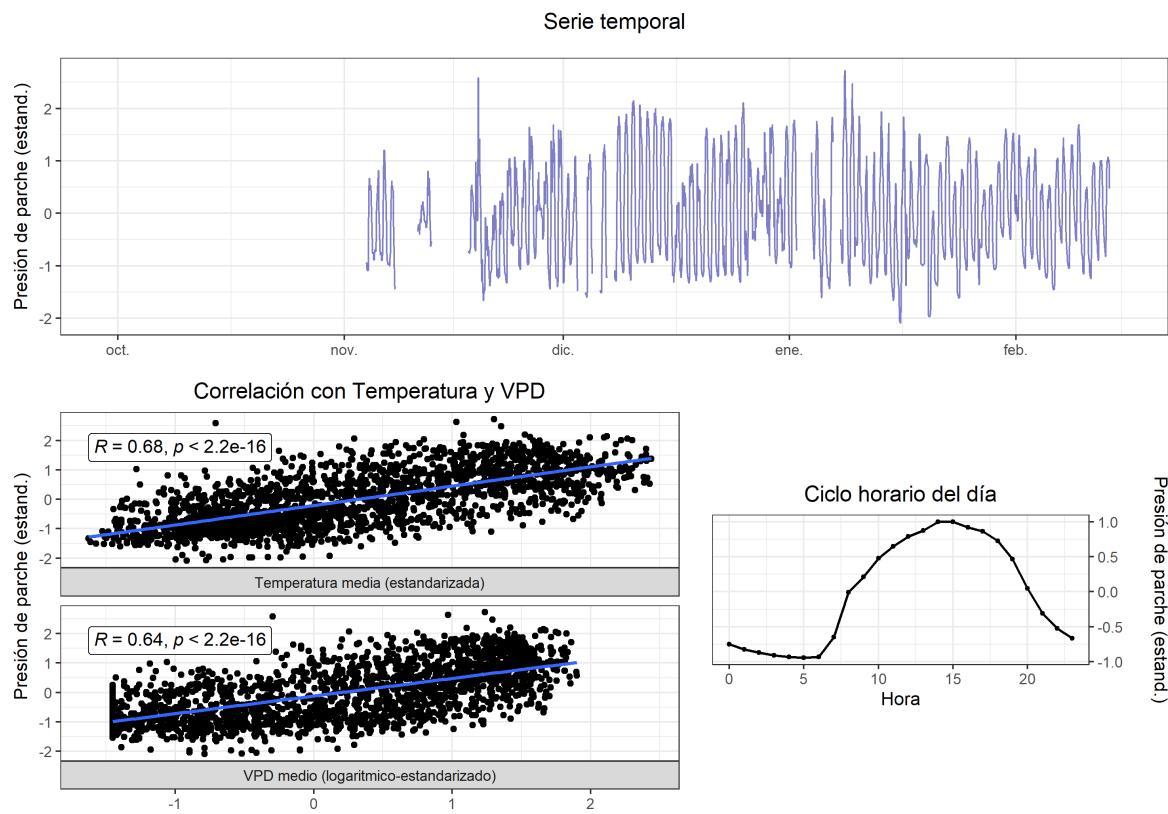
131 T2 (2023-2024)



132 T3 (2023-2024)



133 T4 (2023-2024)

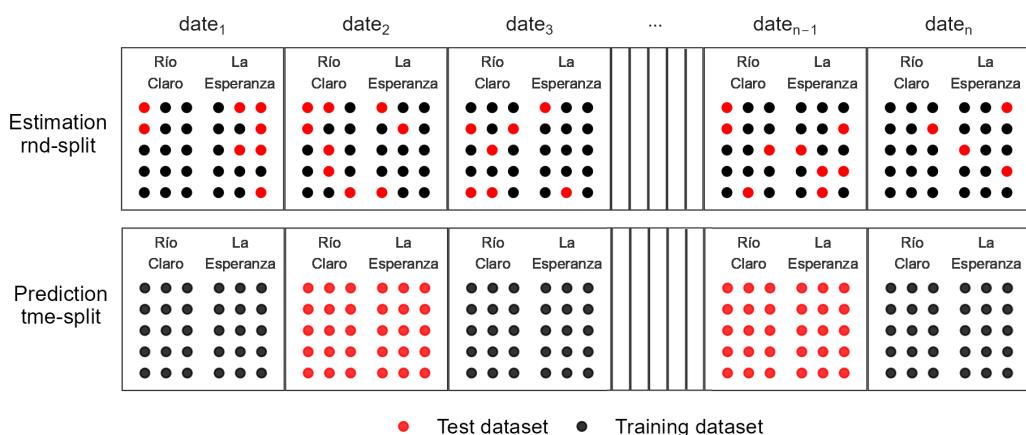


Parte VI

Modelo de potencial y SatOri

134 Modelos basados en tres algoritmos

Los resultados del modelamiento de potencial se muestran a continuación. Se evaluaron 12 configuraciones mediante remuestreo, combinando tres algoritmos (RF, XGBoost y SVM), dos esquemas de partición y el uso o no de componentes principales (PLS). Los dos esquemas de partición corresponden a (i) un esquema aleatorio (`rnd_split`), donde los datos de entrenamiento y prueba se seleccionaron al azar, y (ii) un esquema temporal independiente (`tme_split`), en el que se usaron fechas separadas para entrenamiento y prueba. En ambos casos, el 75% de los datos se asignó al entrenamiento y el 25% a la prueba.

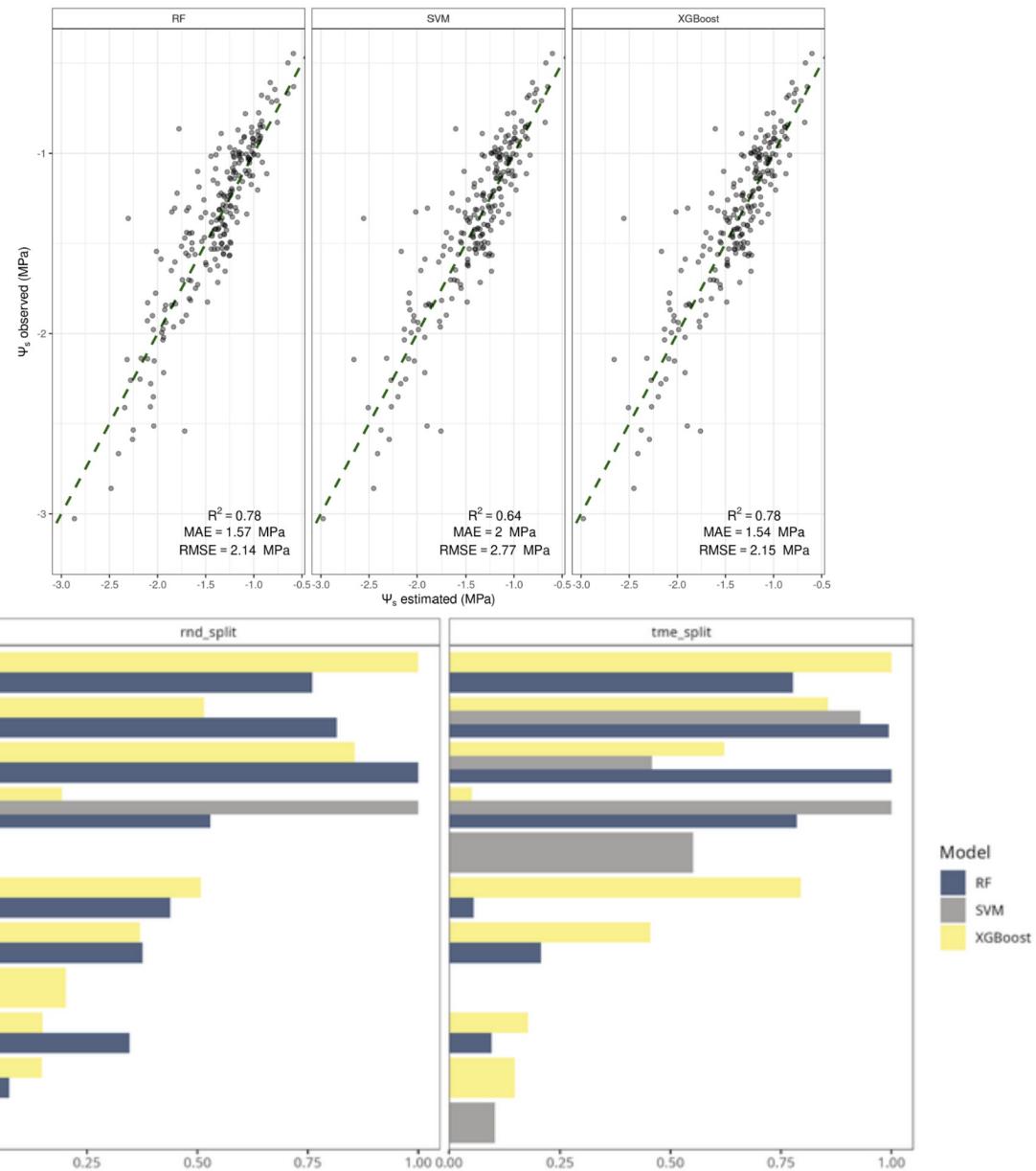


Bajo `rnd_split`, los valores de R^2 oscilaron entre 0.45 y 0.8, con XGBoost (0.77) y RF (0.76) obteniendo el mejor desempeño, seguidos por SVM (0.68). En `tme_split`, el rendimiento fue menor (R^2 entre 0.25 y 0.52), con diferencias menos marcadas entre modelos, destacando XGBoost, pls_SVM y SVM (~0.45).

Respecto a la importancia de las variables, los datos meteorológicos (ET0, VPD y temperatura) fueron los predictores más influyentes en ambos esquemas de partición. En `rnd_split`, SVM destacó la HR como variable clave, mientras que en `tme_split`, HR, VPD y temperatura fueron las más relevantes. Las variables derivadas de Sentinel-2 fueron secundarias en importancia, con MSI, DWSI y NDMI como los predictores más relevantes en ambos esquemas.

Tras la evaluación con remuestreo, los modelos fueron entrenados en el conjunto de prueba. En `rnd_split`, XGBoost y RF alcanzaron un R^2 de 0.76 y un RMSE de 0.24 MPa, mientras

que SVM obtuvo un R^2 de 0.62 y un RMSE de 0.3 MPa. En tme_split, el desempeño fue similar entre modelos ($R^2 = 0.59$), con RMSE entre 0.36 MPa (XGBoost) y 0.39 MPa (SVM). Se observó que el error aumentó en valores inferiores a -1.5 MPa, donde la escasez de datos limitó la capacidad predictiva de los modelos. Esta falta de información en condiciones de estrés hídrico severo se asocia con el cierre estomático, lo que puede afectar la producción y calidad del cultivo.



135 SatOri

135.1 Descripción general

El resultado final de este proyecto corresponde al prototipo de plataforma web SatOri, cuyo objetivo es la optimización del riego en ambos huertos de cerezos (Río Claro y La Esperanza).

Como se mencionó anteriormente, uno de los resultados del proyecto fue el desarrollo del modelo para la estimación del potencial hídrico xilemático con frecuencia diaria y de forma espacial. Además, para cada uno de los campos se logró obtener el punto umbral de potencial hídrico xilemático (TLP), el que corresponde al nivel mínimo al cuál puede llegar cada sector de riego.

Con el modelo de estimación diaria y espacial, más el umbral mínimo de potencial hídrico xilemático se implementó la plataforma web de SatOri.

135.2 Diseño de la aplicación

La aplicación fue creada en el lenguaje de programación R y con las plataformas de desarrollo [Github](#) y el servidor [Shinyapps](#).

En Github, mediante los “Github Actions” se automatizó la descarga de datos satelitales y meteorológicos de forma diaria para cada uno de los huertos, de acuerdo a disponibilidad. “Github Actions” se encarga de procesar los datos, suavizar los indicadores de vegetación obtenidos de Sentinel-2 y correr el modelo de machine learning, para estimar el potencial hídrico xilemático para cada día.

La plataforma fue creada con el paquete {shiny} de R.

135.2.1 Funcionamiento de la aplicación

El riego en los huertos frutales se realiza por sectores de riego, por lo que SatOri debe adaptarse a cómo se riega. Por lo tanto, una vez que se tiene estimado el potencial hídrico xilemático, se promedia su valor para cada sector de riego. Por otra parte, se tienen los valores de umbrales de riego mínimo para cada huerto. De acuerdo a esto, la plataforma define tres zonas de estado hídrico del sector de riego.

Esto se definió de la siguiente forma, la zona de color verde corresponde, a cuando el potencial hídrico xilemático se encuentra por sobre el umbral más un factor de seguridad. En este caso se asume que el sector se encuentra sin problemas de abastecimiento de agua. Luego, se tiene un sector amarillo, que se encuentra entre el punto umbral y el umbral más el factor de seguridad. Cuando el sector de riego llega a este nivel, la plataforma indica cuánto tiempo se debe regar. Esto lo realiza mediante el cálculo de la evapotranspiración de cultivo de los últimos dos días. Por último se tiene una zona naranja, la que indica que el sector de riego se encuentra por debajo del valor umbral. En este caso, la plataforma indica un tiempo de riego de acuerdo a los últimos cinco días de evapotranspiración de cultivo, esto con el objetivo de provocar un aumento rápido del estado hídrico.

135.3 Dashboard de la plataforma

En la Fig. 1 se muestra el dashboard de inicio de la plataforma SatOri. En él, se distinguen dos pestañas: “Panel” y “Resumen Temporada”. La Fig. 1 se encuentra desplegando las opciones de la pestaña “Panel”.



Figura 135.1: Figura 1: Dashboard ejemplo de la plataforma SatOri, pestaña “Panel”.

En los botones que se encuentran en la parte izquierda de la pantalla, el usuario puede seleccionar el huerto que quiere revisar, la temporada, y la fecha específica; para poder visualizar el potencial.

El mapa visualizará el potencial del huerto seleccionado y para el día seleccionado. En el mapa se puede pinchar en alguno de los sectores de riego. Al pinchar en alguno, los gráficos que se

encuentran a la derecha, mostraran los datos de potencial para dicho sector. La linea en rojo que se muestra, corresponde a los valores de potencial de los últimos siete días. Los colores, verde, amarillo y rojo, indican los diferentes niveles de estado hídrico que pueda alcanzar el sector. En el ejemplo, se ve que la linea para el sector de riego seleccionada se encuentra en verde por lo tanto no es necesario regar.

En el caso que la linea roja llegue a la zona de color amarillo, la plataforma dará un aviso de que es necesario regar e indicara el tiempo de riego para cada sector.

Por otra parte, en la parte superior de la aplicación, se muestra un resumen de cuantos sectores de riego están en verde, amarillo y rojo.

La Fig. 2 muestra la plataforma en la pestaña “Panel”. En este caso se muestra un mapa ampliado con el detalle de la variación del potencial hídrico xilemático durante toda la temporada para los sectores de riego.



Figura 135.2: Figura 2: Dashboard ejemplo plataforma SatOri, pestaña “Resumen Temporada”.

135.4 Acceso a la plataforma

Se puede acceder a la plataforma por medio de la página web de difusión del proyecto <https://s4tori.cl> o directamente por medio del link <https://s4tori.cl/app>.

References

Halbritter, Aud H., Amy Eycott, Sabine Reinsch, y Hans De Boeck. 2020. «The handbook for standardised field and laboratory measurements in terrestrial climate-change experiments and observational studies (ClimEx)». *Methods in Ecology and Evolution* 11 (1): 22-37.