

Informe ID21I10297

M. Abel Herrera y Francisco Zambrano

2025-03-21

Tabla de contenidos

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.

Reporte de Calidad y Producción 2022-2023

El presente libro incluye los resultados de la evaluación de la calidad y producción de cerezos durante las temporadas 2022-2023 y 2023-2024. Sin embargo, 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.

Las cosechas se realizaron el 23 de diciembre de 2022 en Río Claro y el 12 de diciembre de 2022 y 2023 en La Esperanza. 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](#).

Parte I

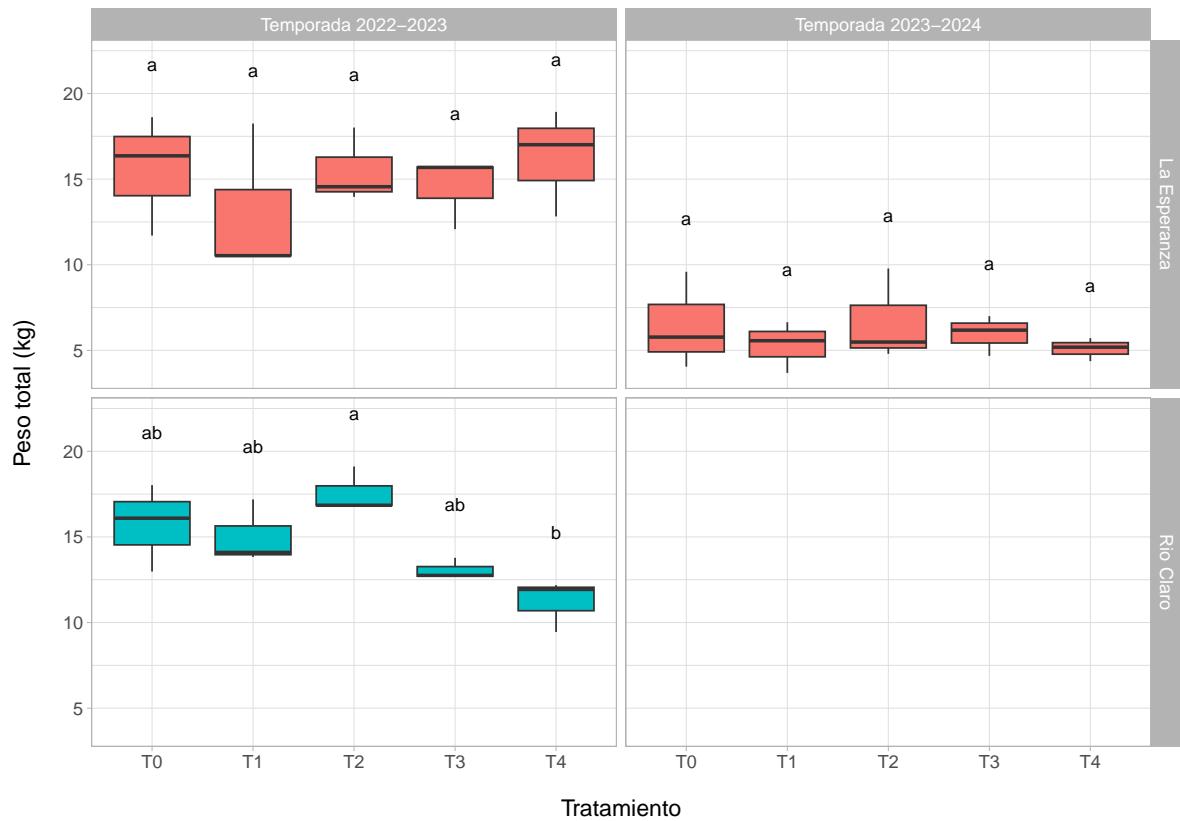
Producción

1 Producción

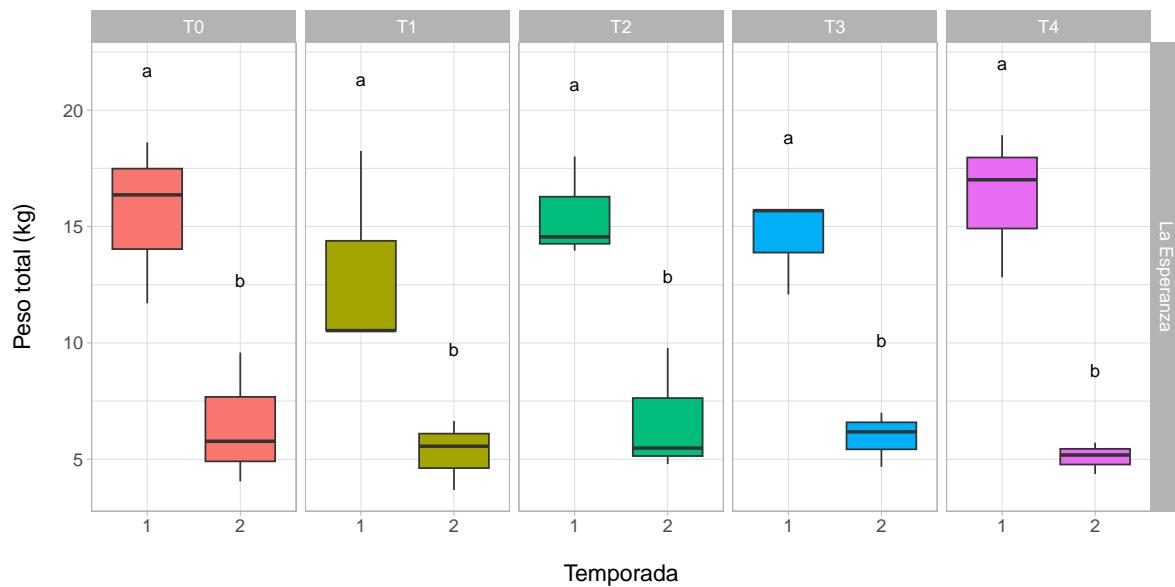
1.1 Peso total

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.

2 Por tratamiento

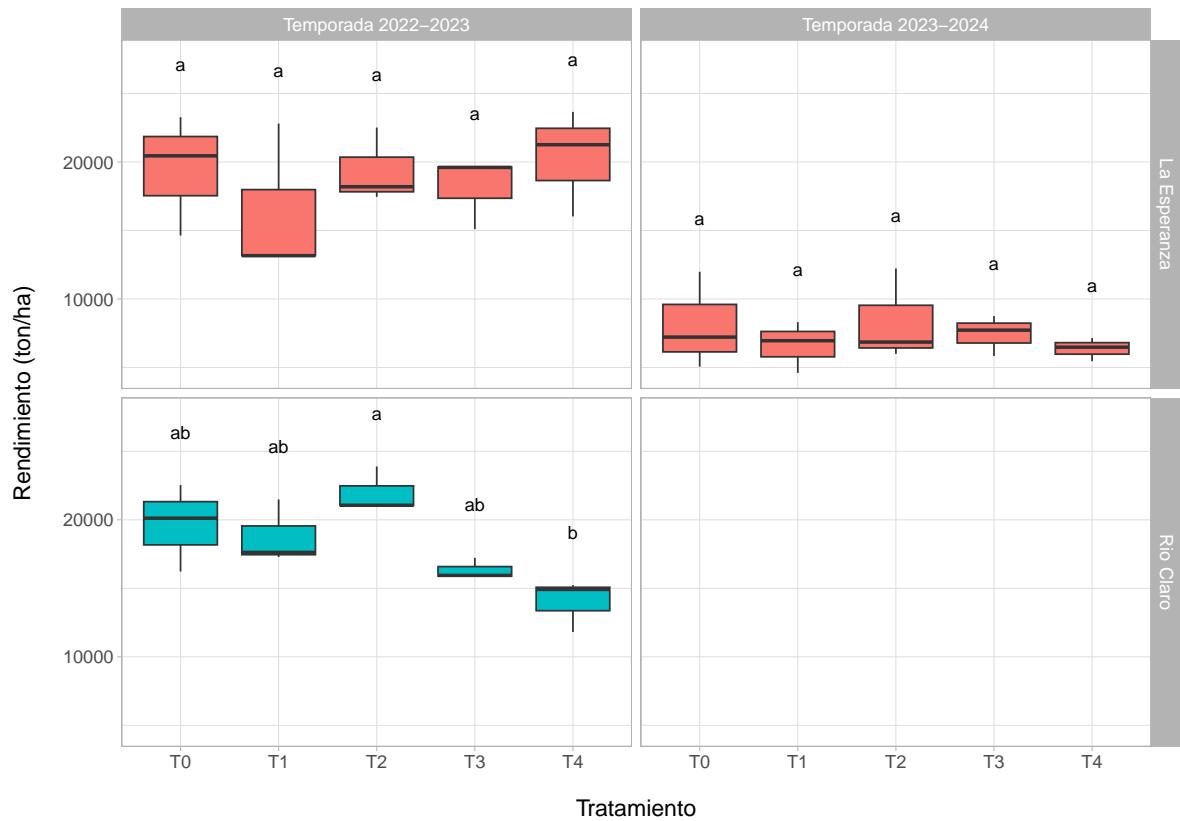


3 Por temporada

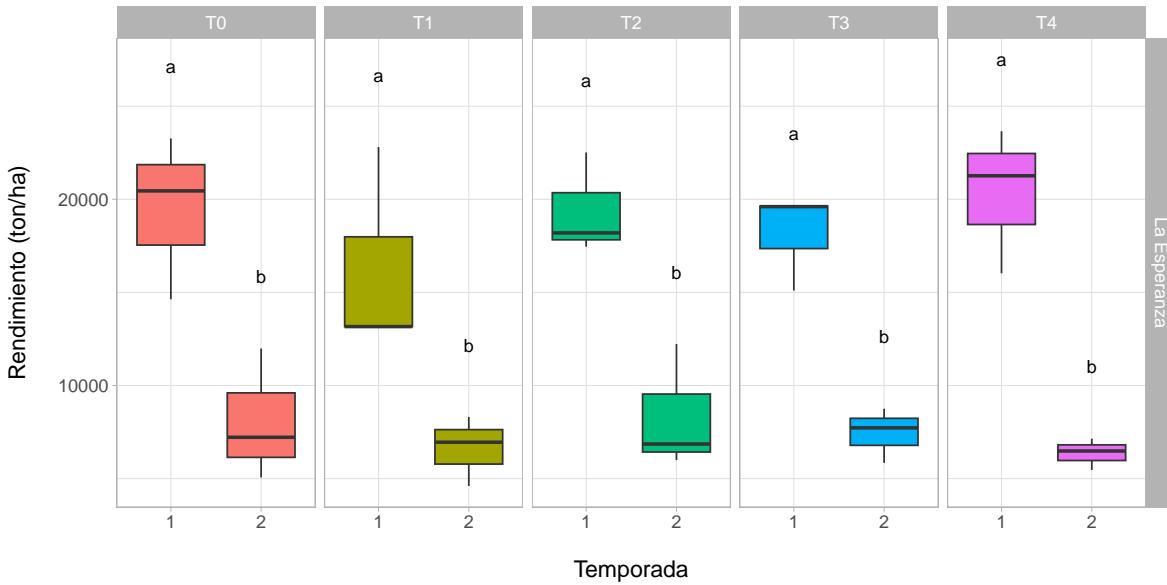


3.1 Rendimiento

4 Por tratamiento



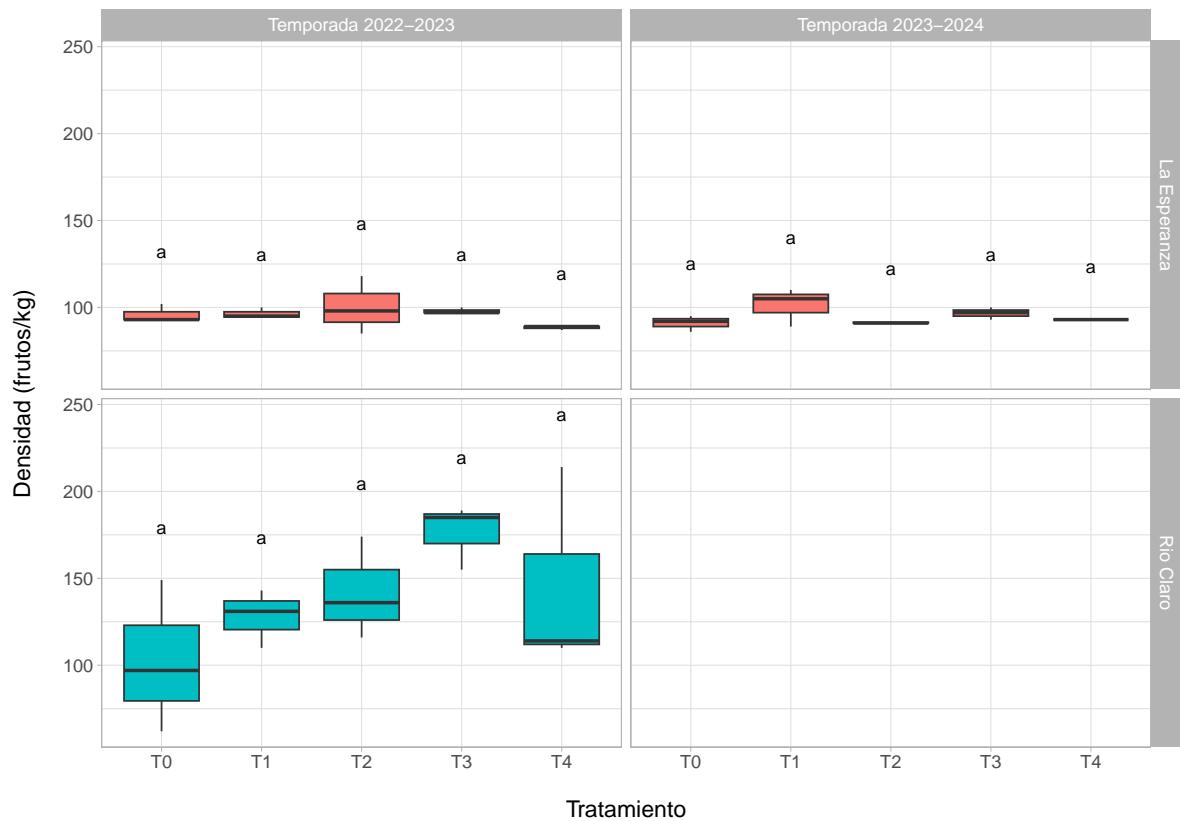
5 Por temporada



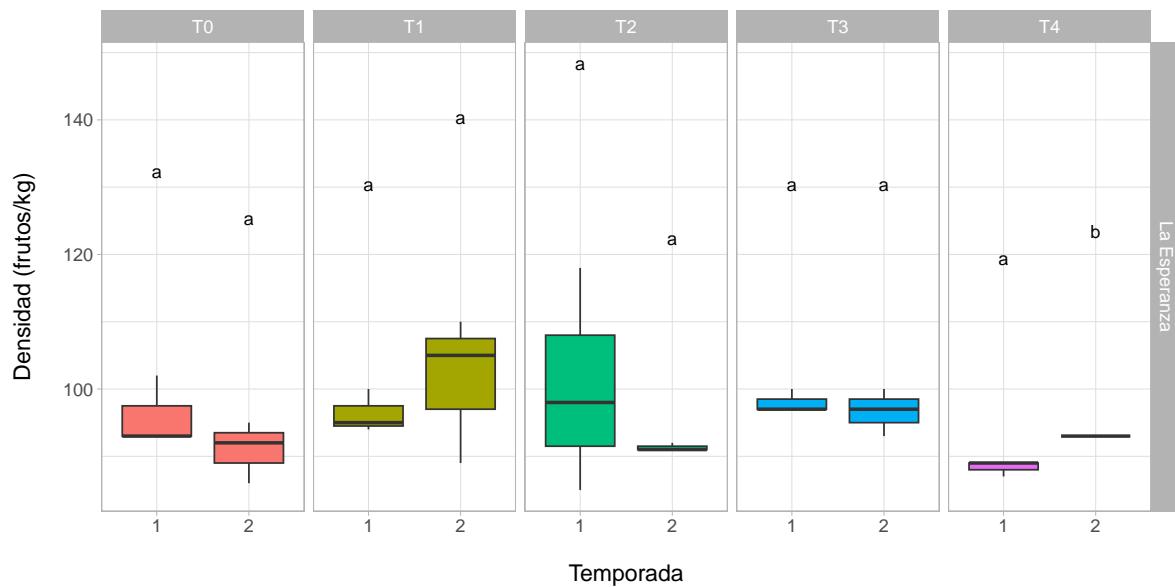
5.1 Densidad

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.

6 Por tratamiento



7 Por temporada



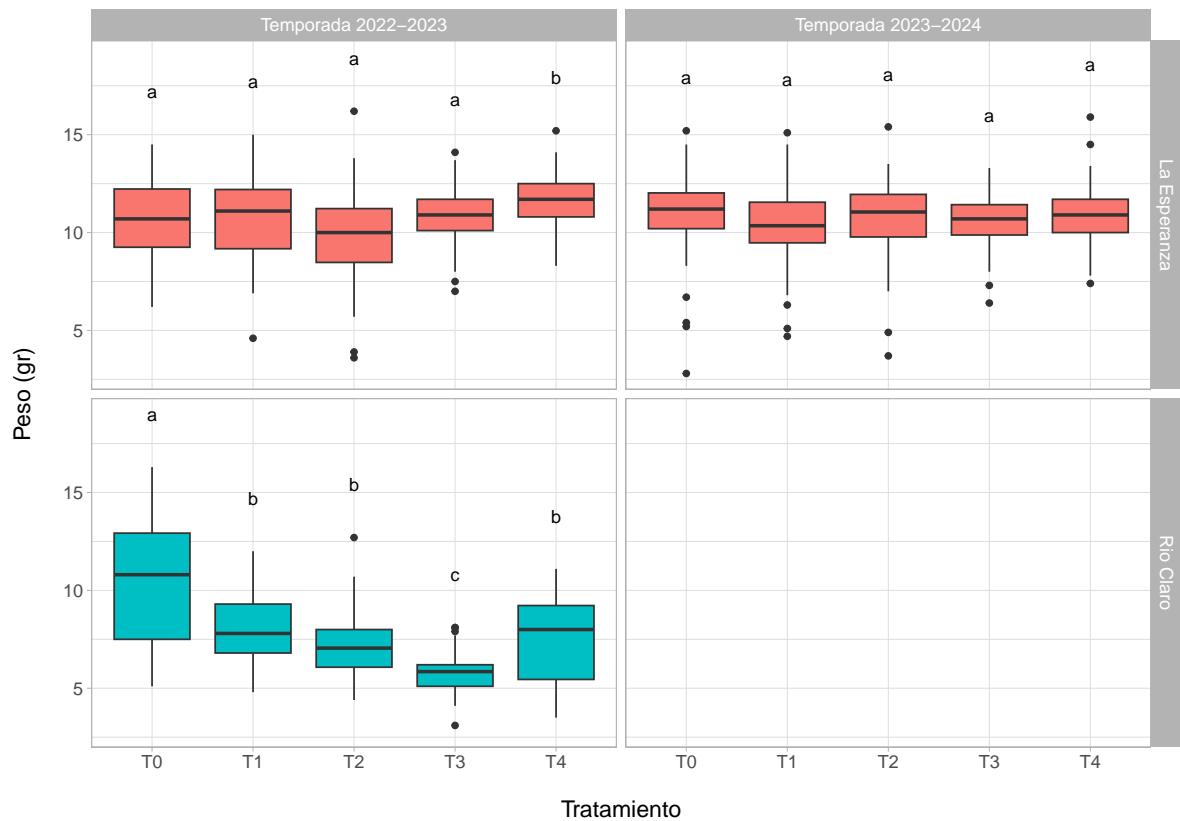
8 Calidad

8.1 Apariencia

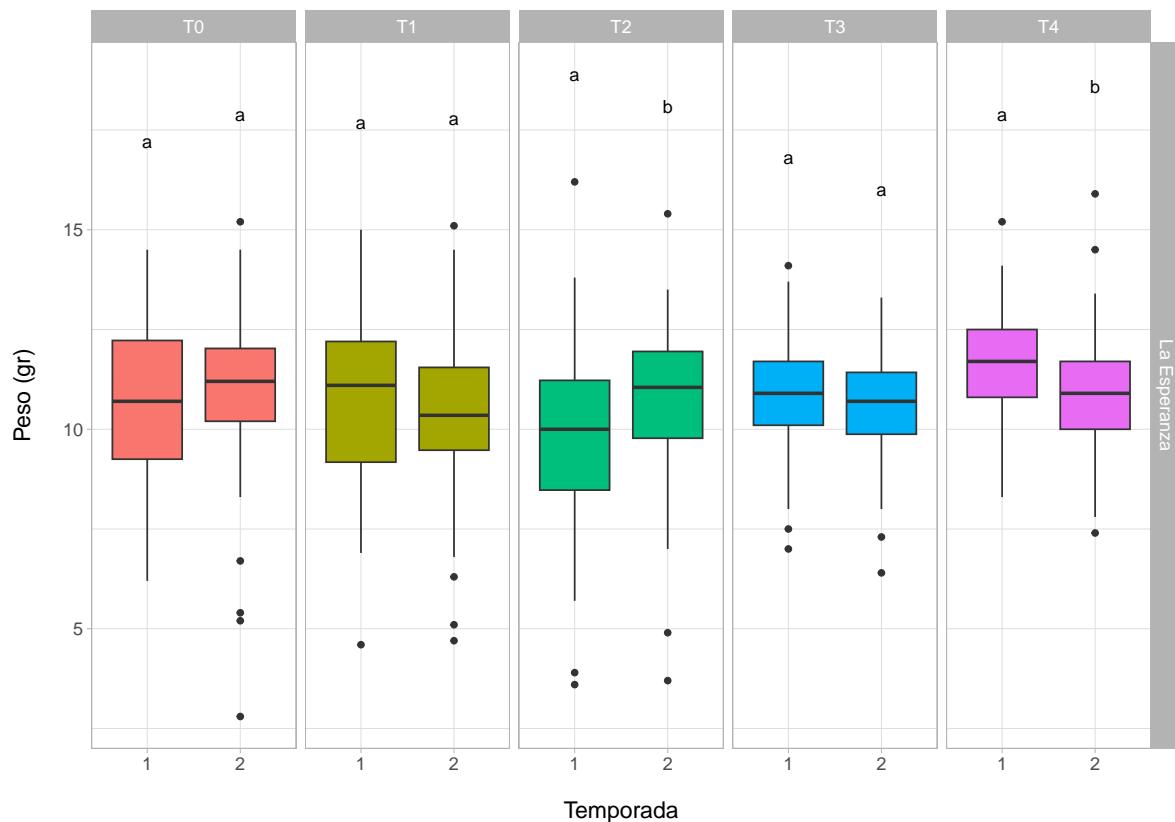
8.1.1 Peso

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.

9 Por tratamiento



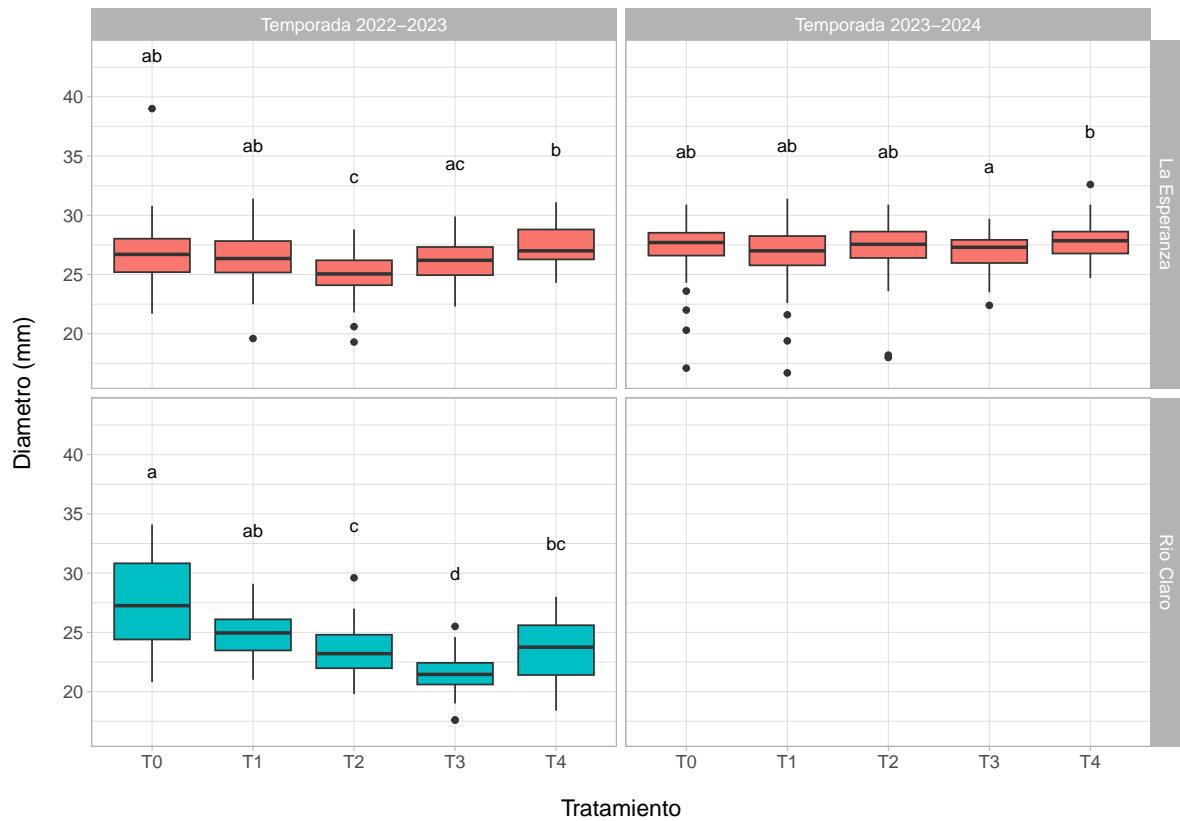
10 Por temporada



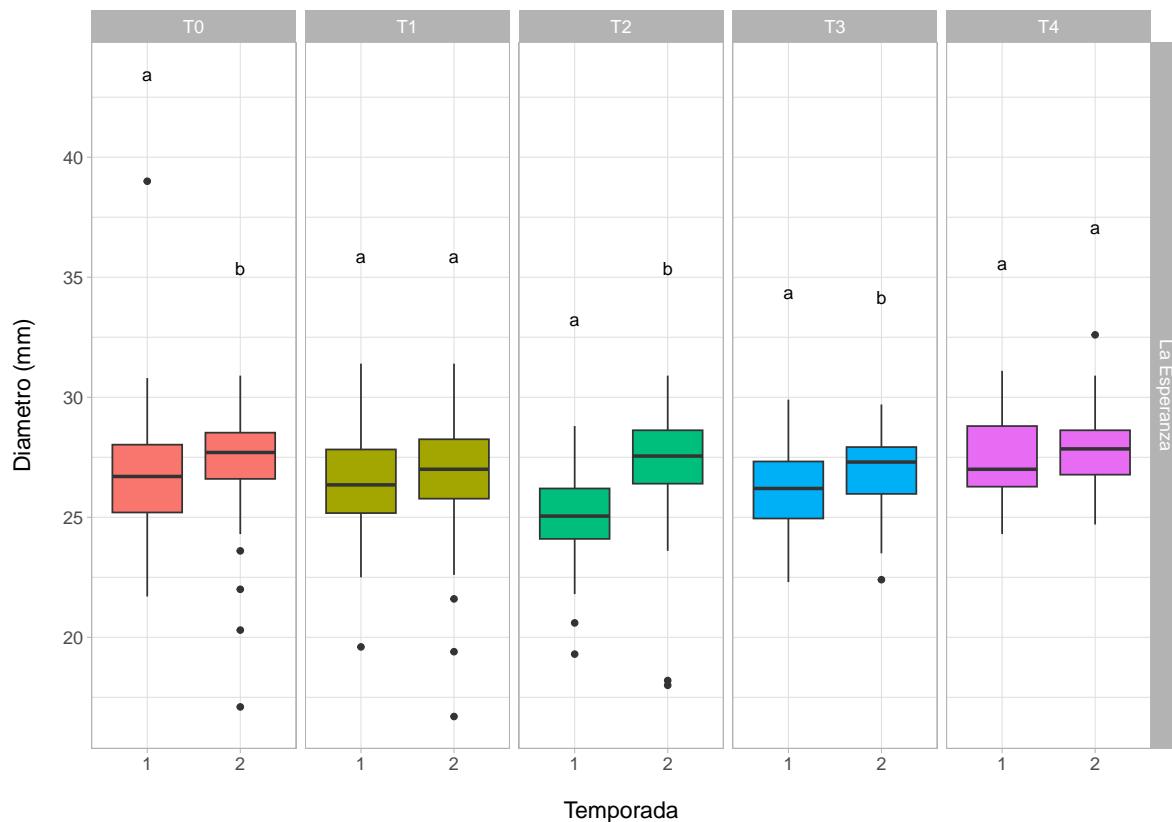
10.0.1 Diametro

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.

11 Por tratamiento



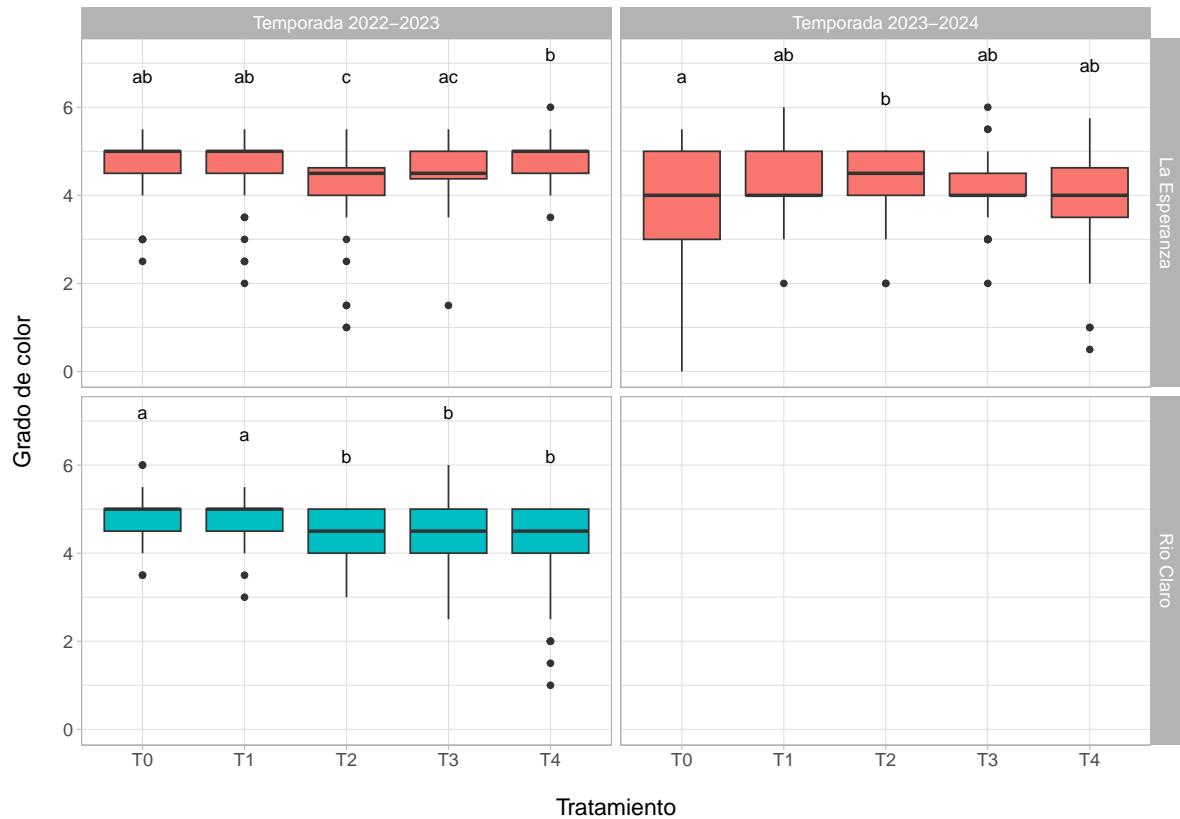
12 Por temporada



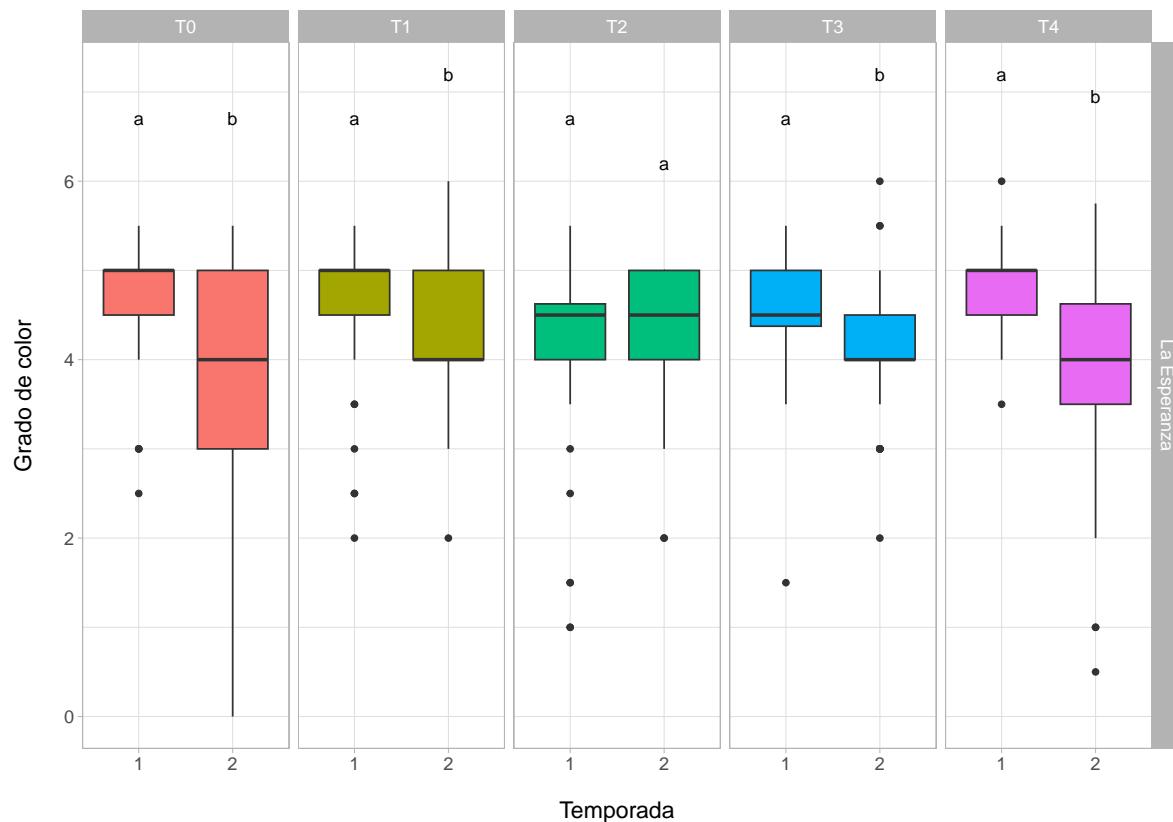
12.1 Color

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.

13 Por tratamiento



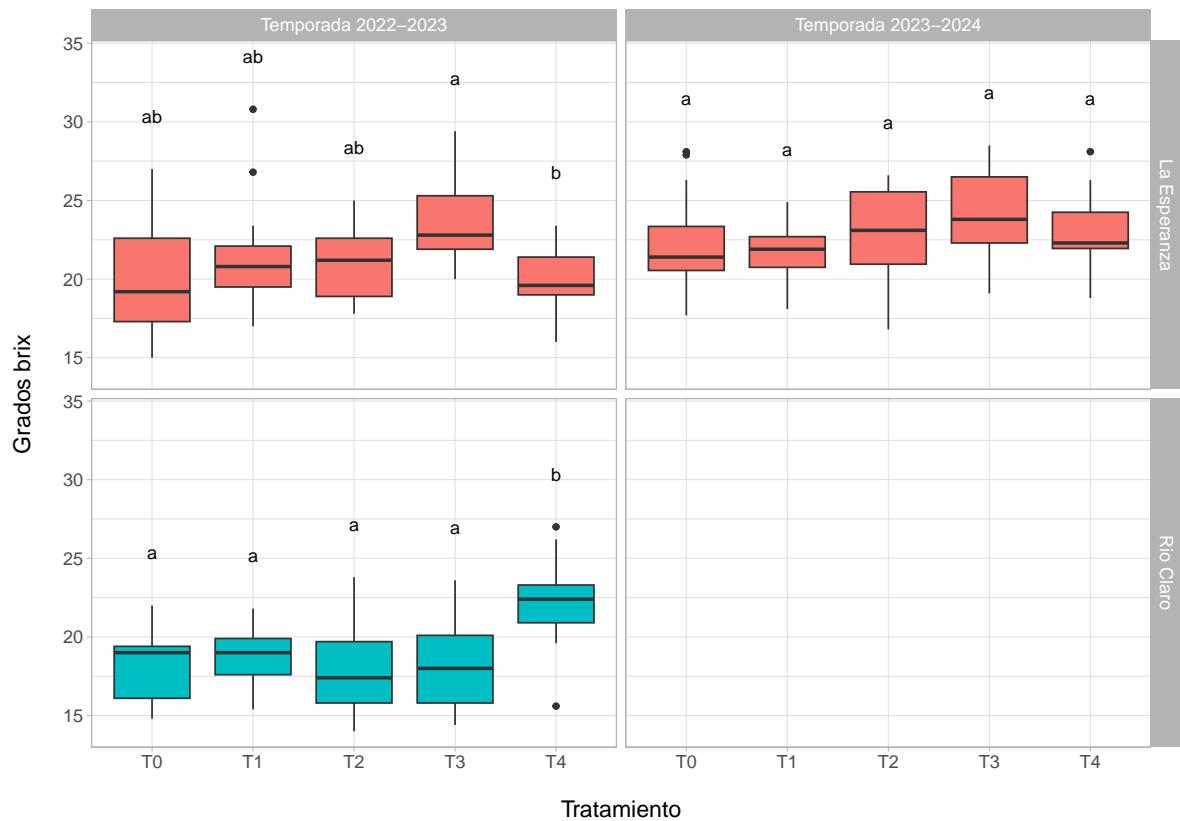
14 Por temporada



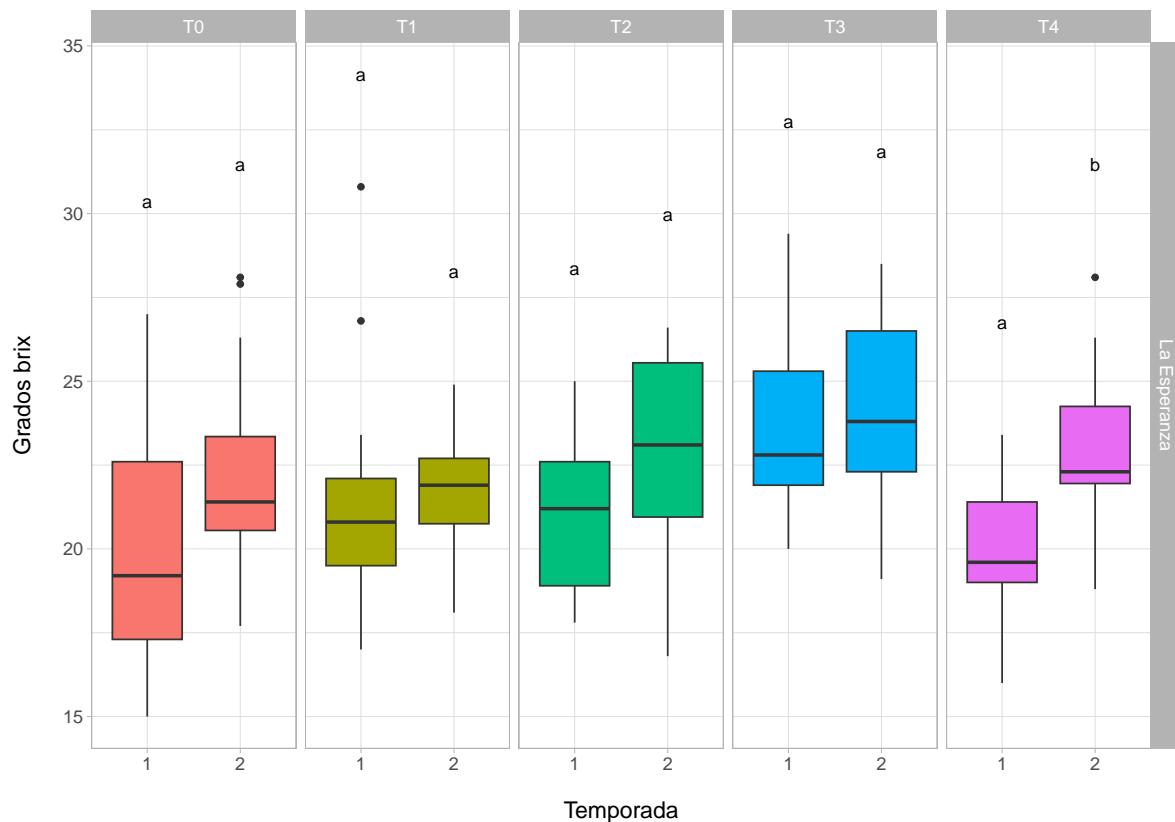
14.1 Contenido de azúcar

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.

15 Por tratamiento

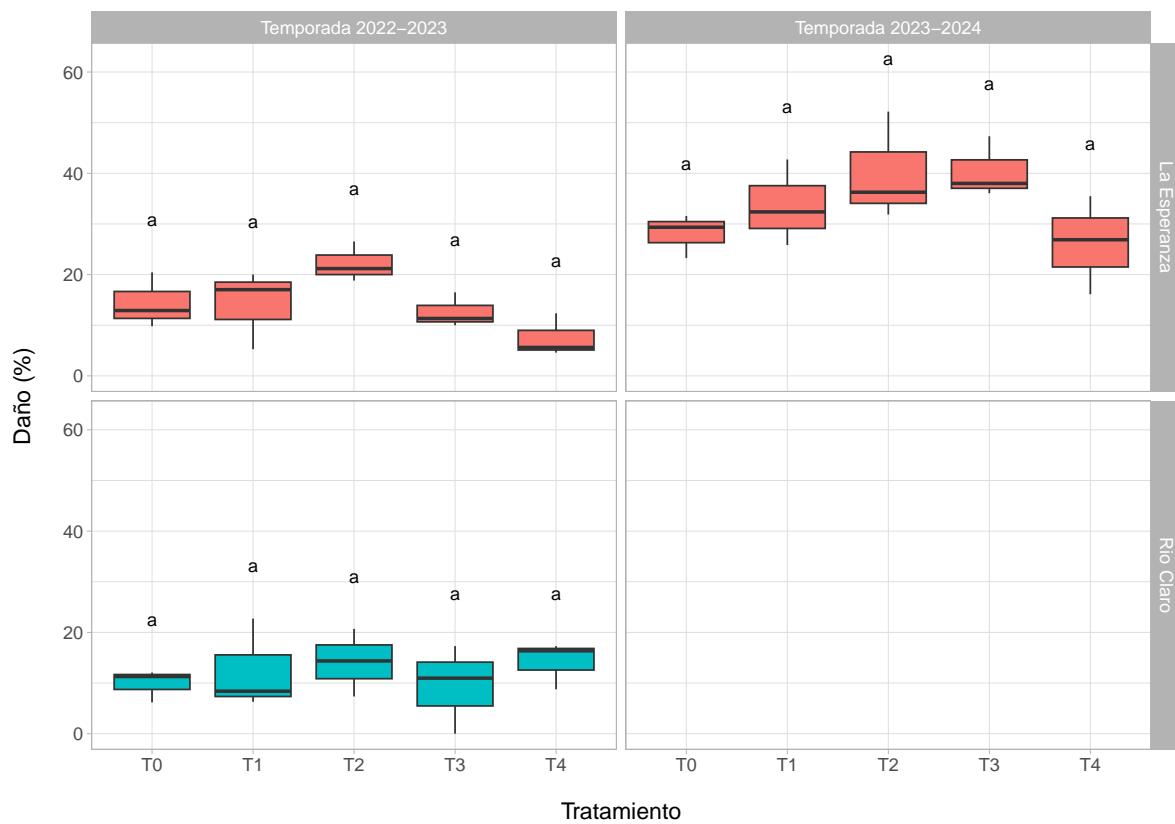


16 Por temporada

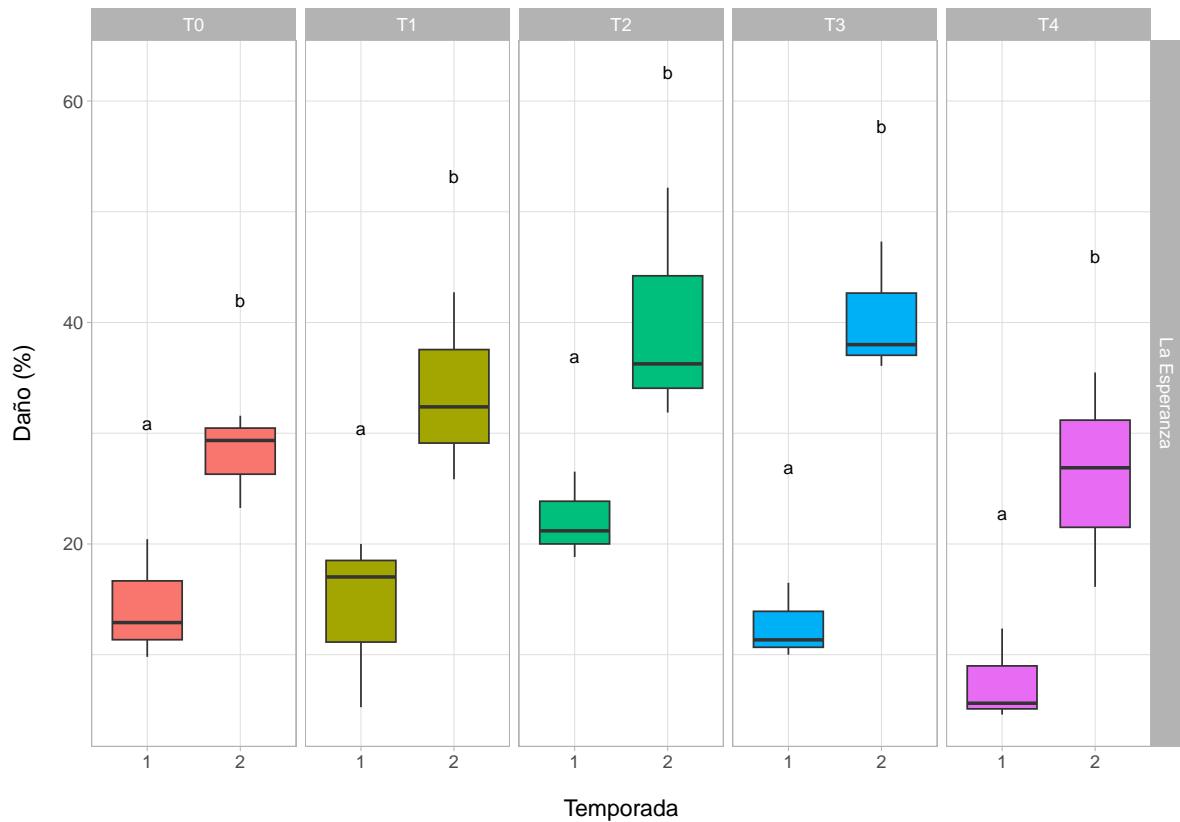


16.1 Daño

17 Por tratamiento



18 Por temporada

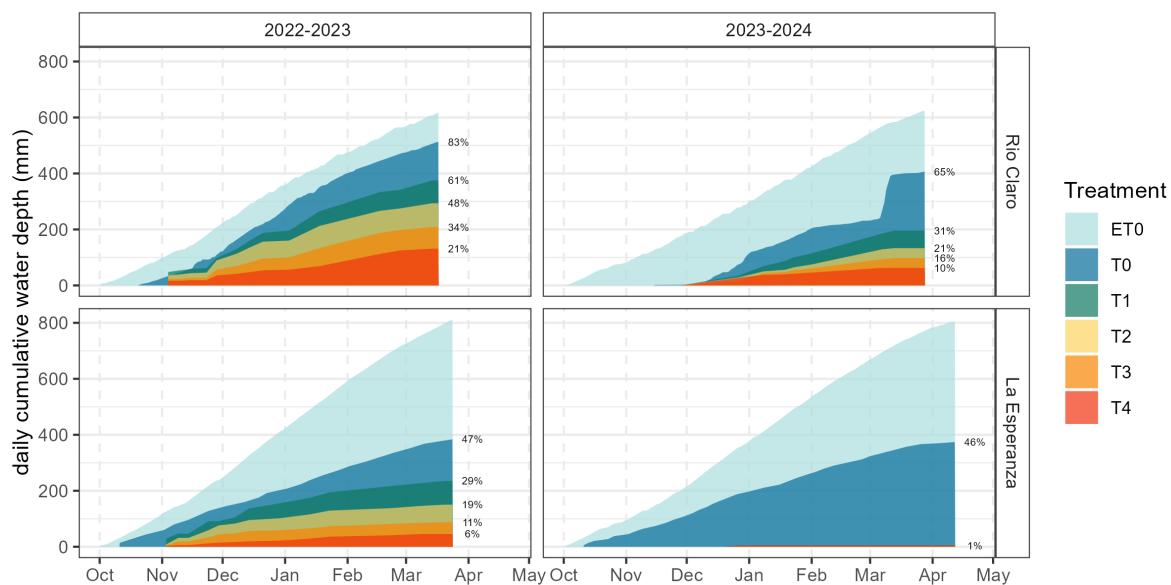


Parte II

Variables meteorológicas

19 Riego

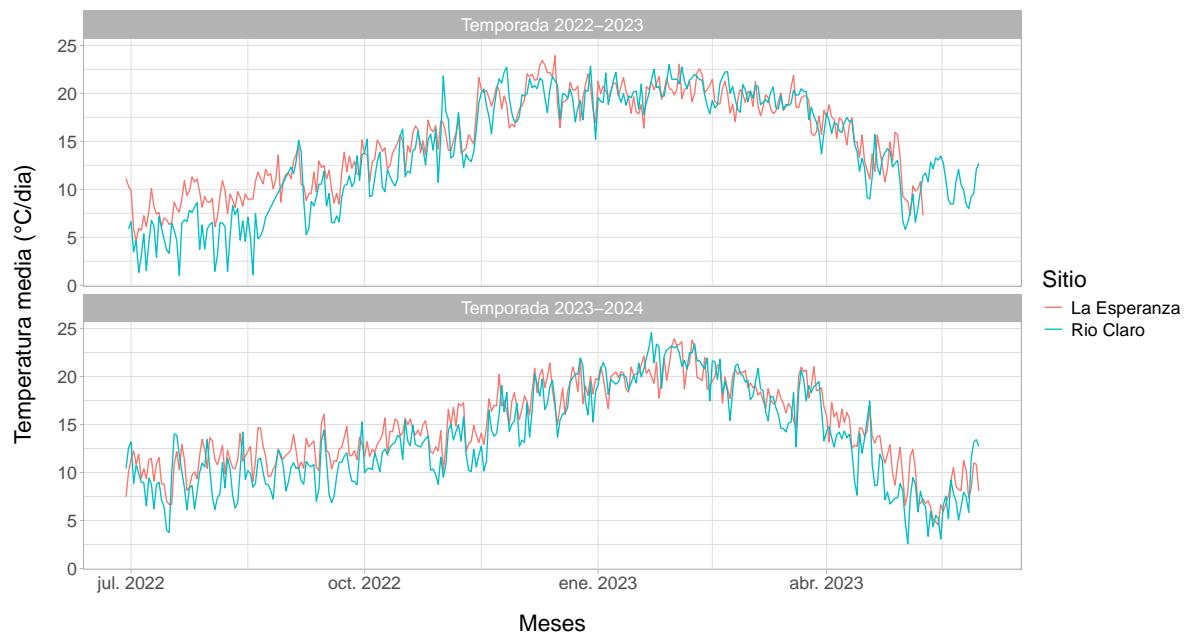
El gráfico muestra la lámina de agua acumulada correspondiente a la evapotranspiración de referencia (ET) y al riego aplicado en cada tratamiento durante las temporadas 2022-2023 y 2023-2024 en ambos sitios. Las estrategias de riego con déficit hídrico (RDC) redujeron significativamente el volumen de agua aplicada en comparación con el riego del productor local (T0). En la temporada 2022-2023, T0 alcanzó el 83% y 47% de la ET en Rio Claro y La Esperanza, respectivamente. Para los tratamientos con restricción hídrica, en Rio Claro, T1 recibió el 61% de la ET, T2 el 47%, T3 el 34% y T4 el 21%, mientras que en La Esperanza, T1 recibió el 47%, T2 el 29%, T3 el 11% y T4 solo el 6%. En 2023-2024, T0 representó el 65% y 46% de la ET en Rio Claro y La Esperanza, respectivamente. En Rio Claro, los tratamientos T1 a T4 alcanzaron el 31%, 21%, 16% y 10% de la ET, mientras que en La Esperanza no se aplicó riego en estos tratamientos debido a la falta de impacto observado en la temporada anterior.



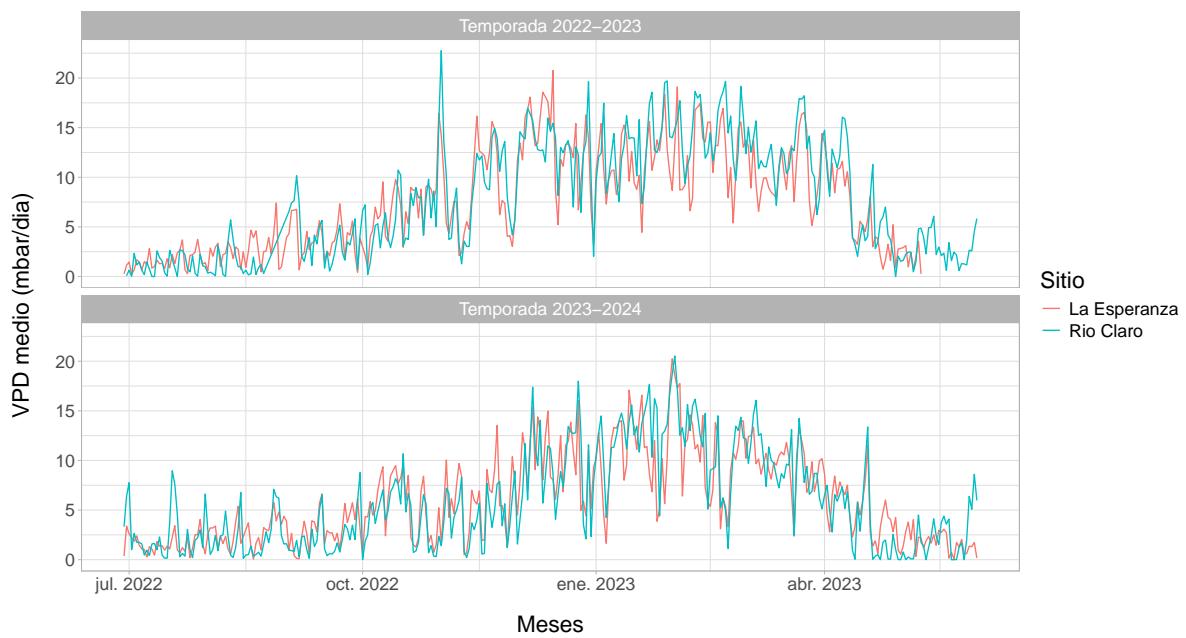
20 Clima

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

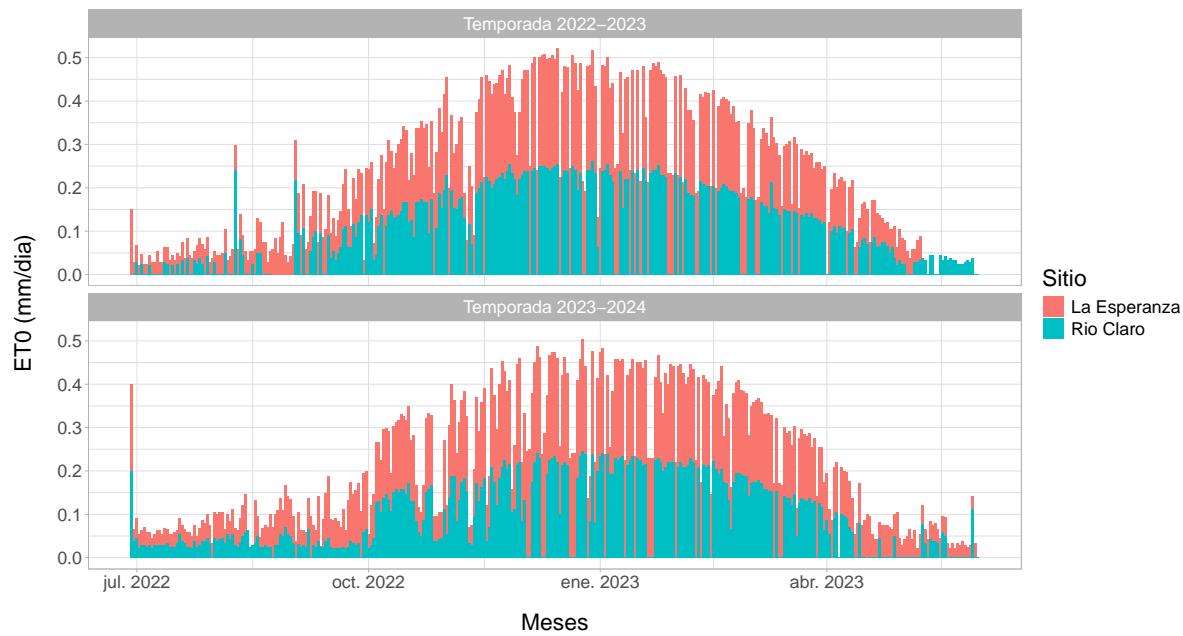
21 Temperatura



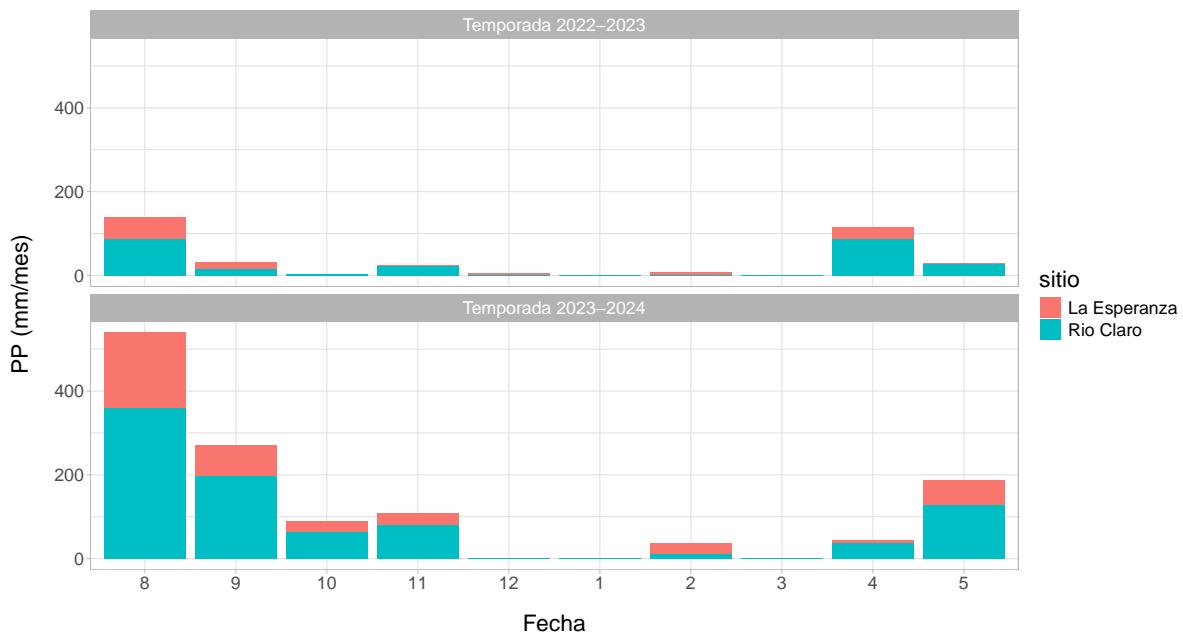
22 Déficit de presión de vapor (VPD)



23 Evapotranspiración de referencia (ET0)

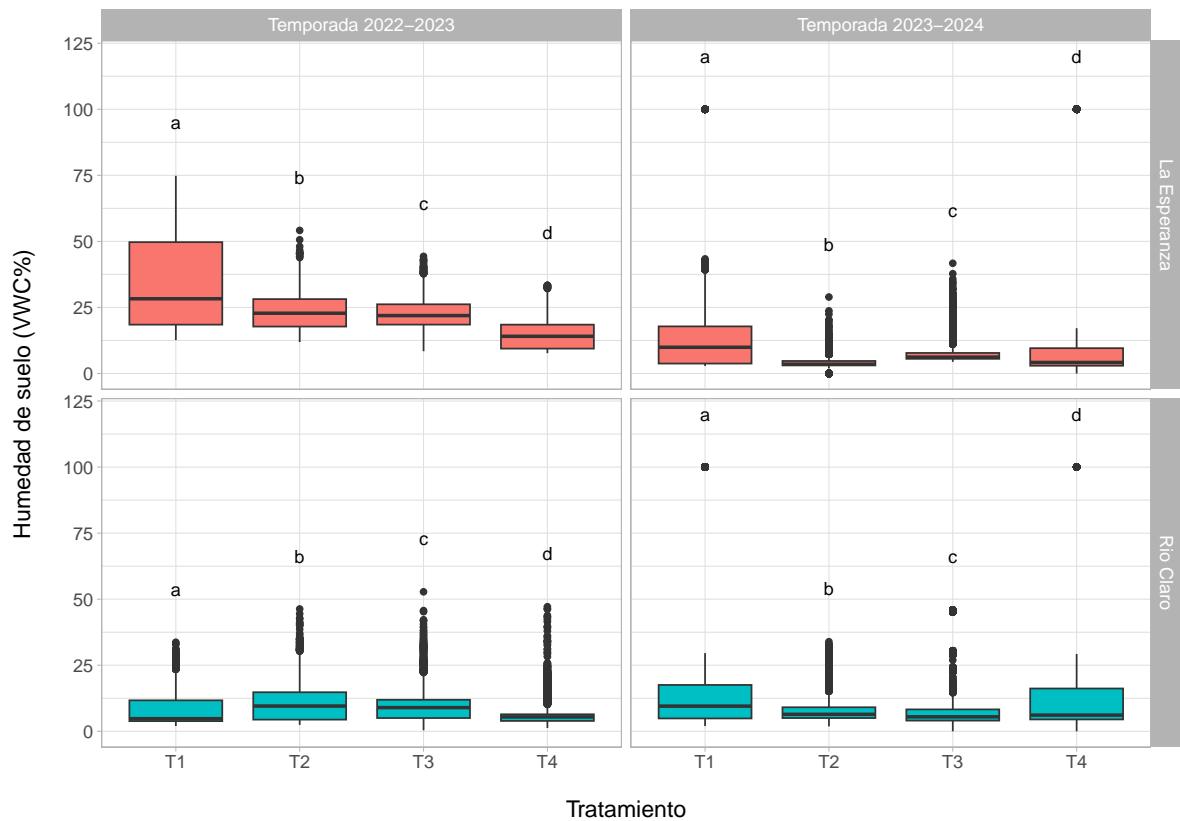


24 Precipitación

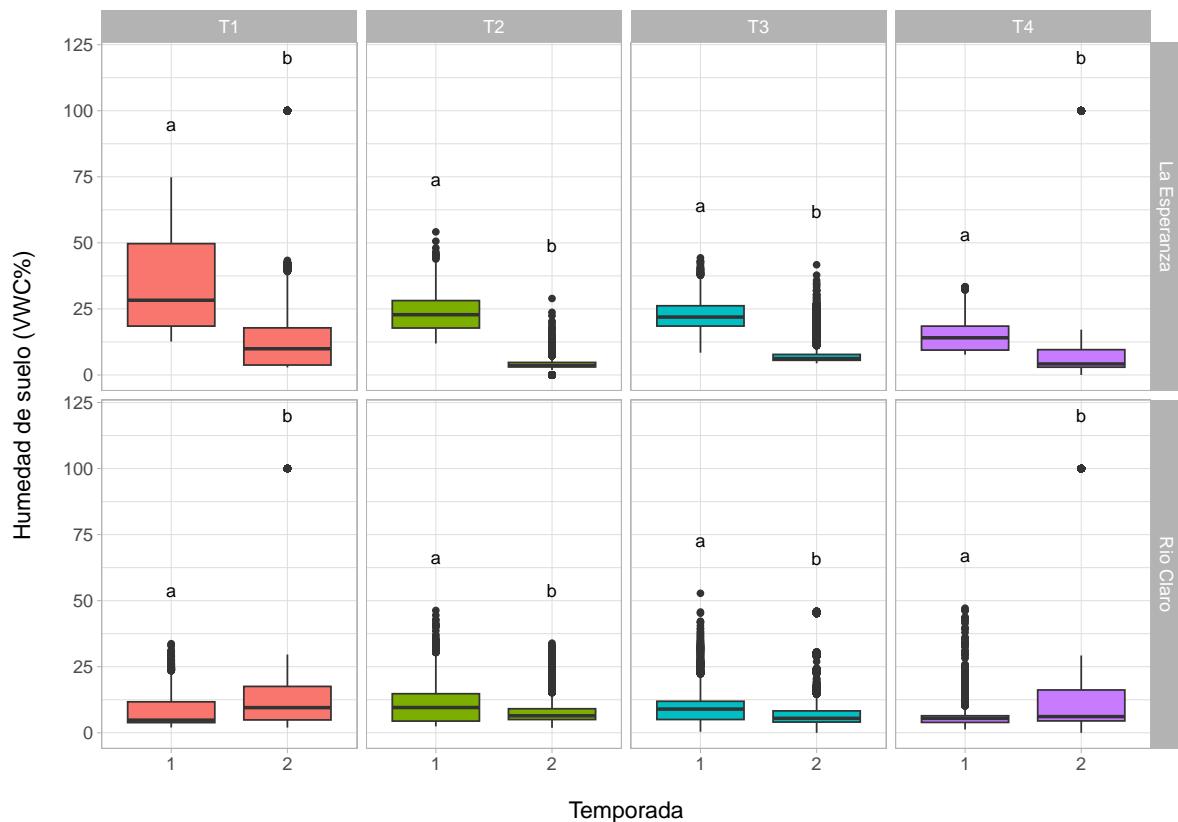


25 Humedad de suelo

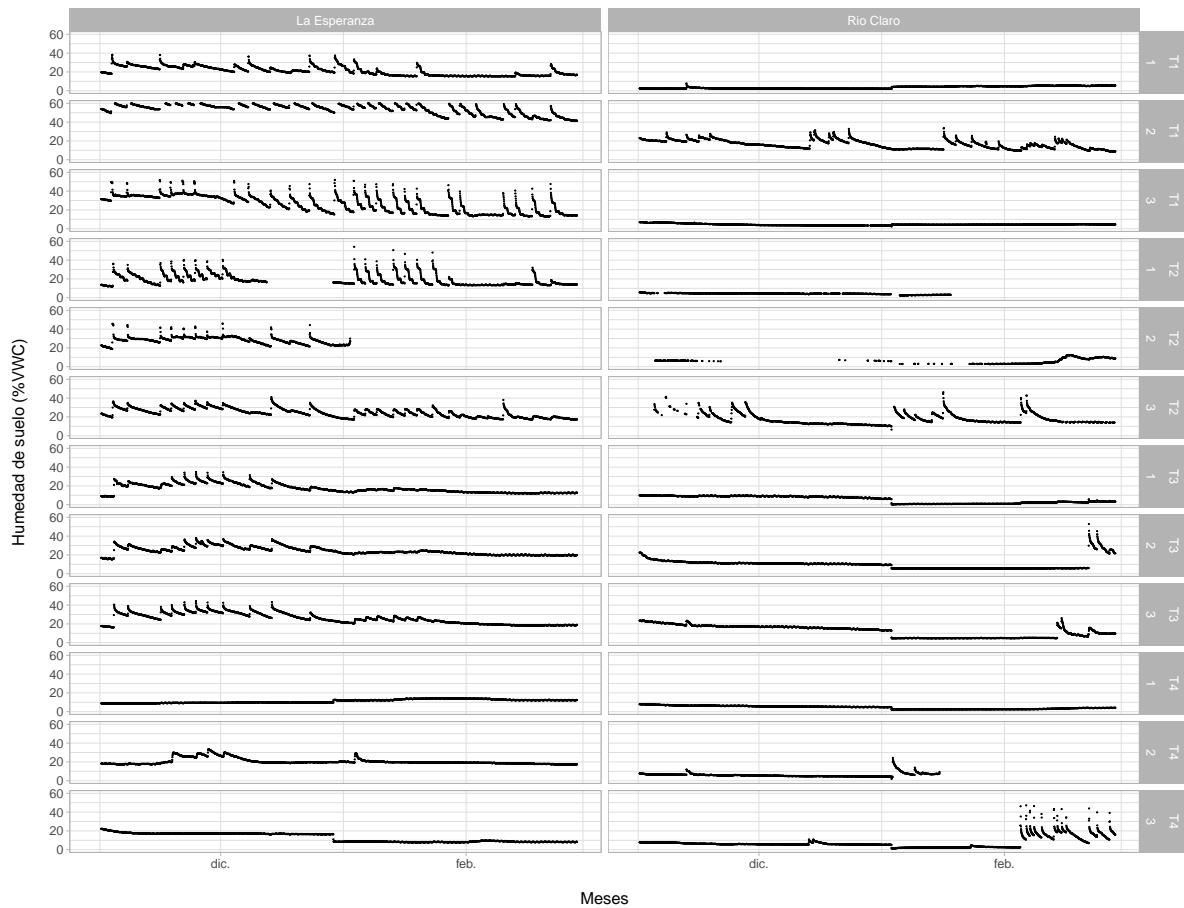
26 Por tratamiento



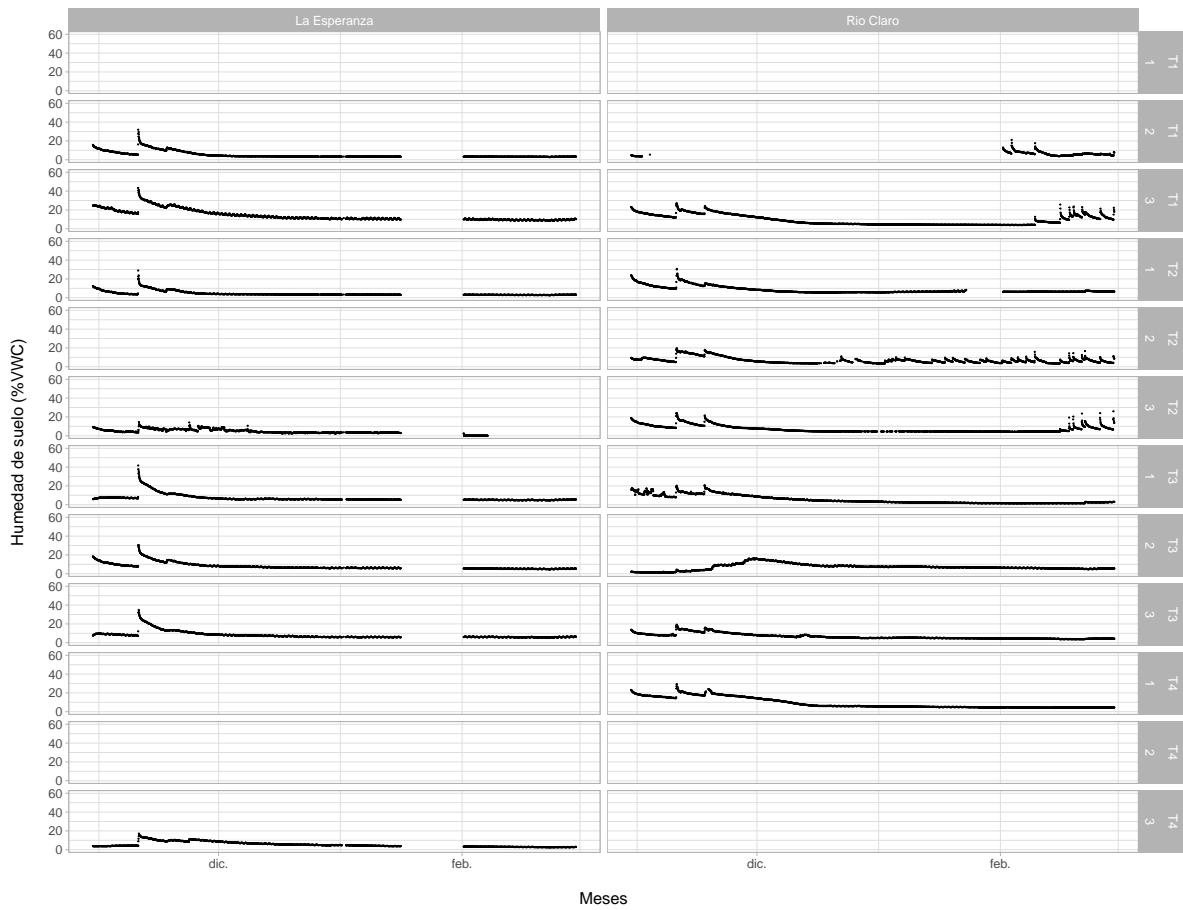
27 Por temporada



28 Serie temporal 2022-2023



29 Serie temporal 2023-2024



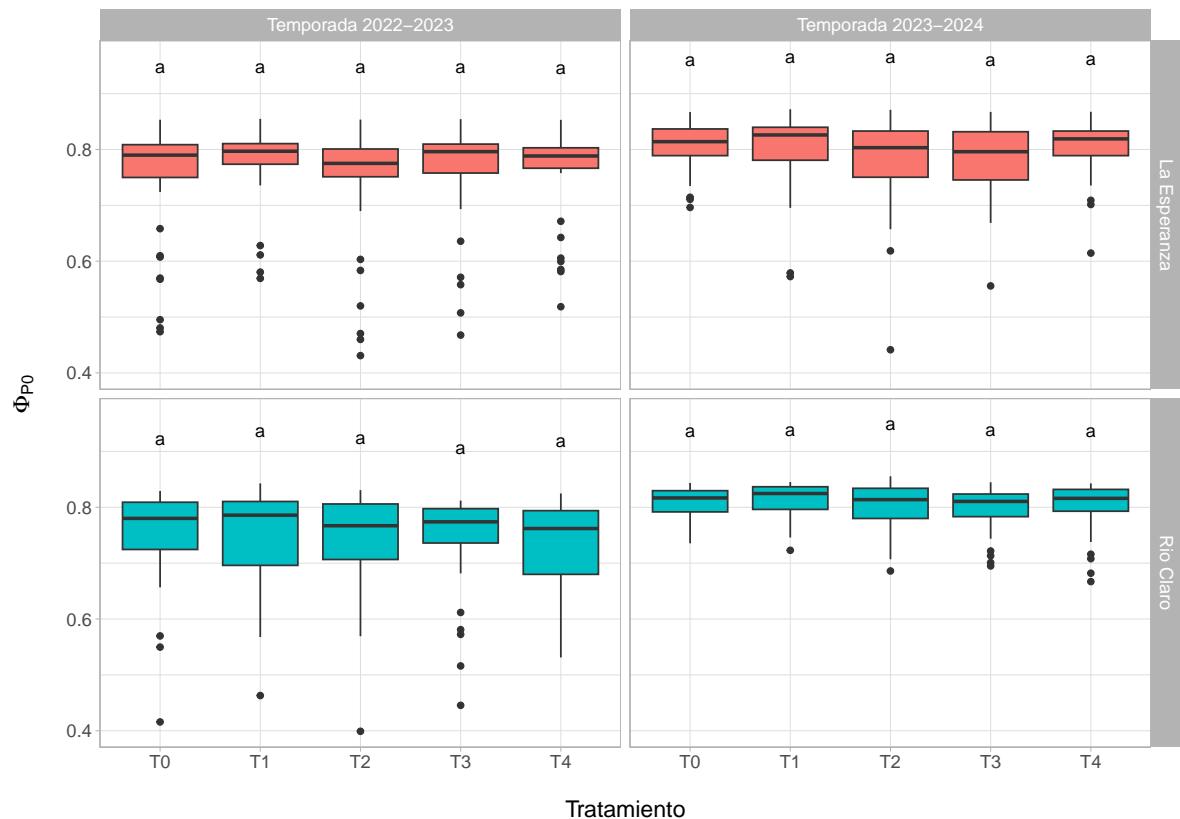
Parte III

Parámetros fisiológicos

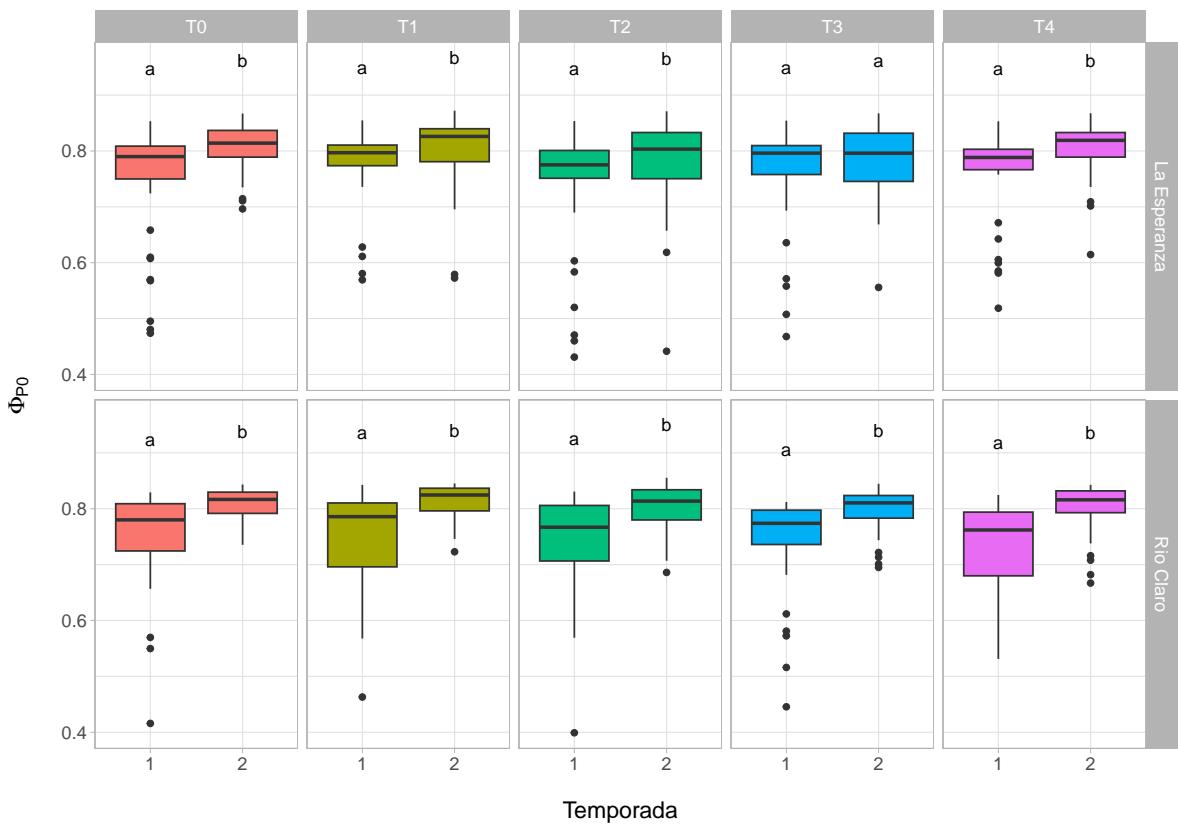
30 Parámetros fisiológicos

30.1 Fluorescencia

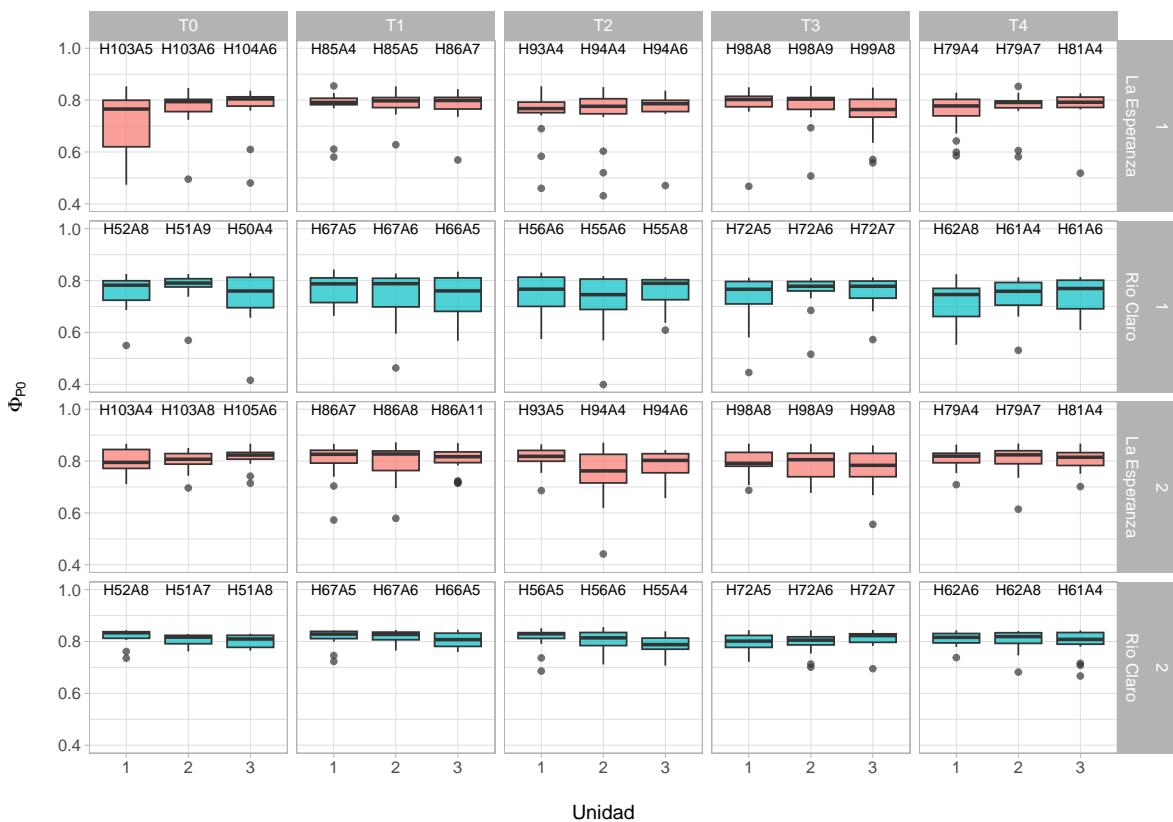
31 Por tratamiento



32 Por temporada

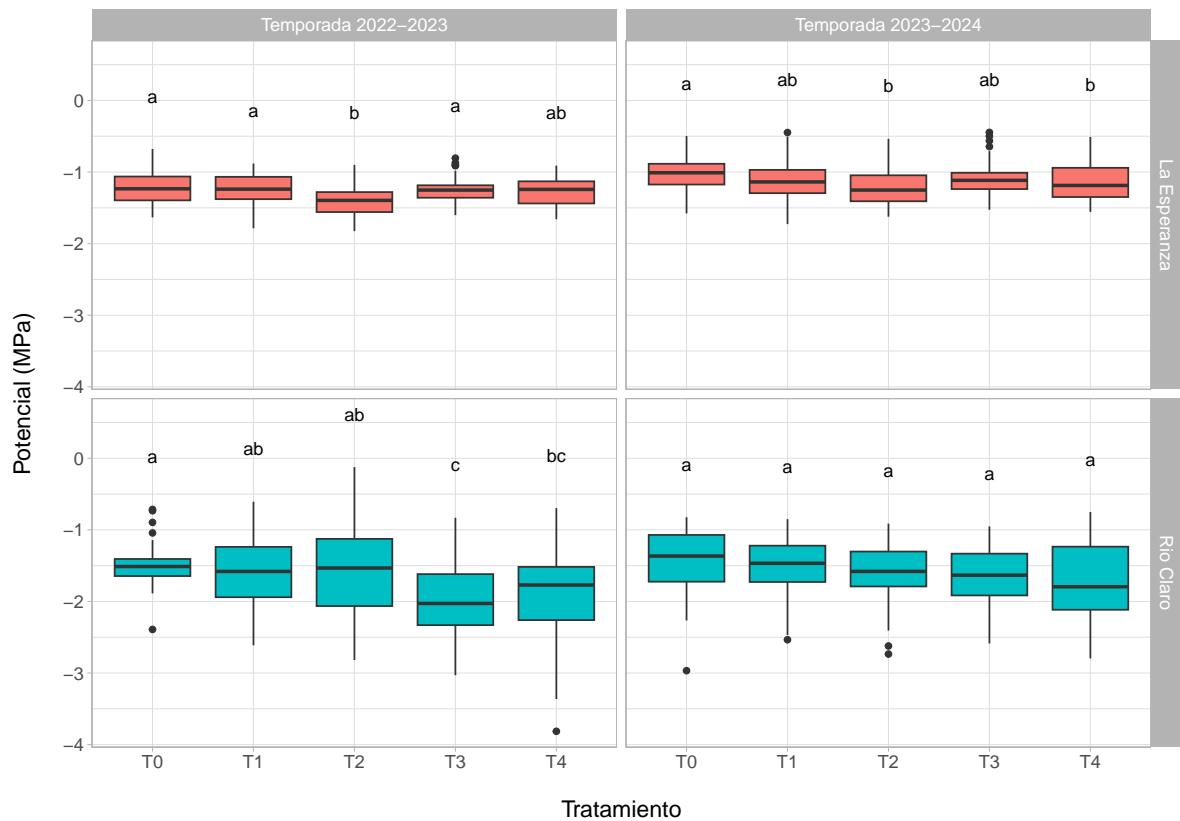


33 Series temporales

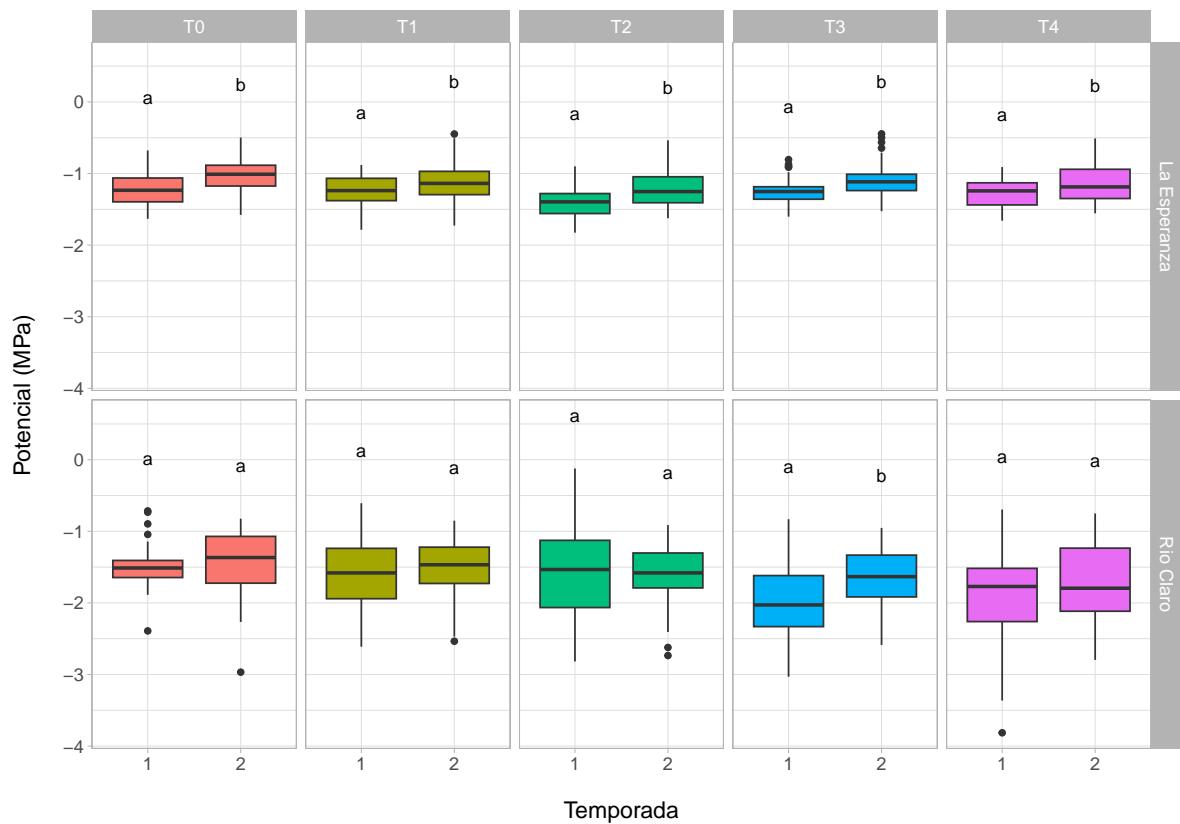


33.1 Potencial

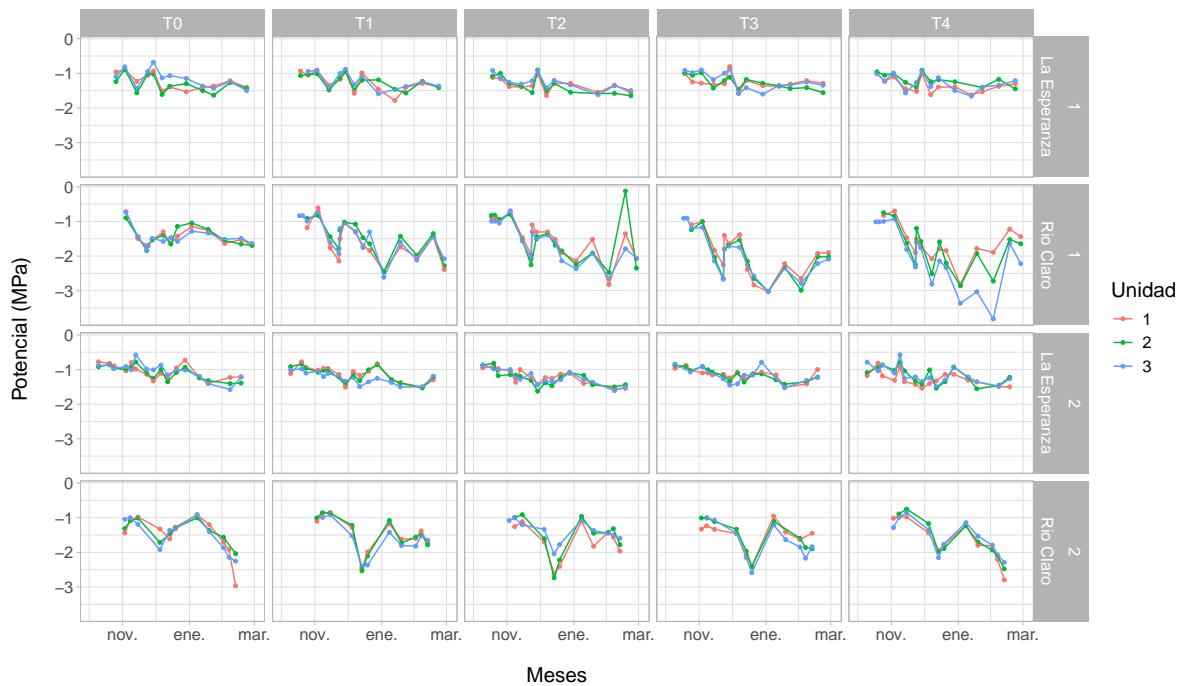
34 Por tratamiento



35 Por temporada

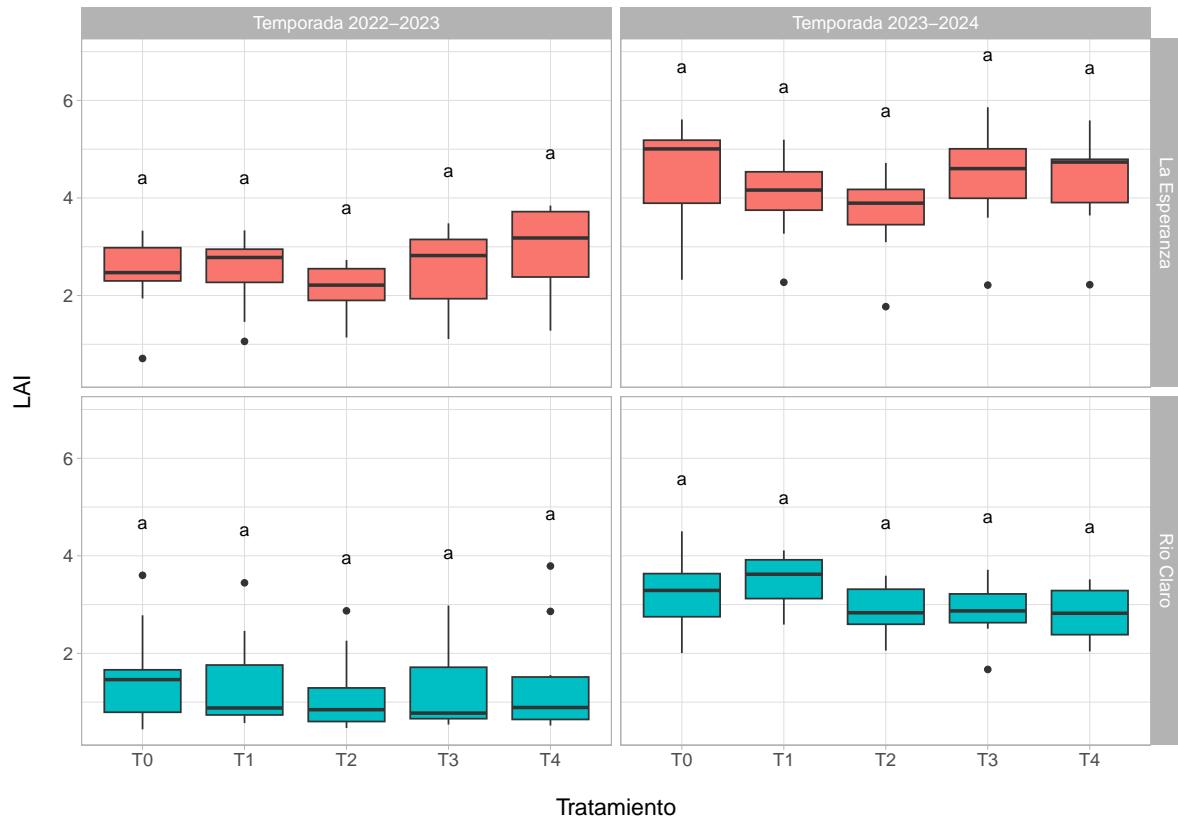


36 Serie temporal

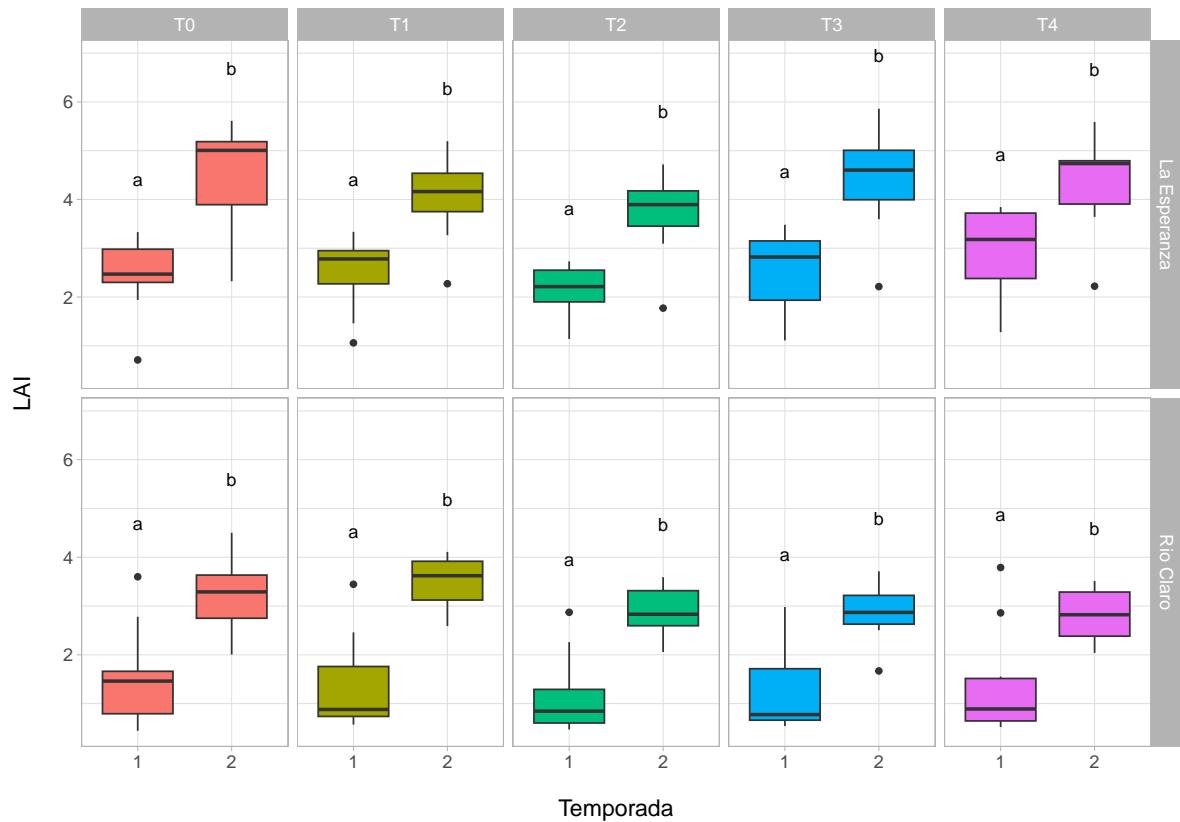


36.1 LAI

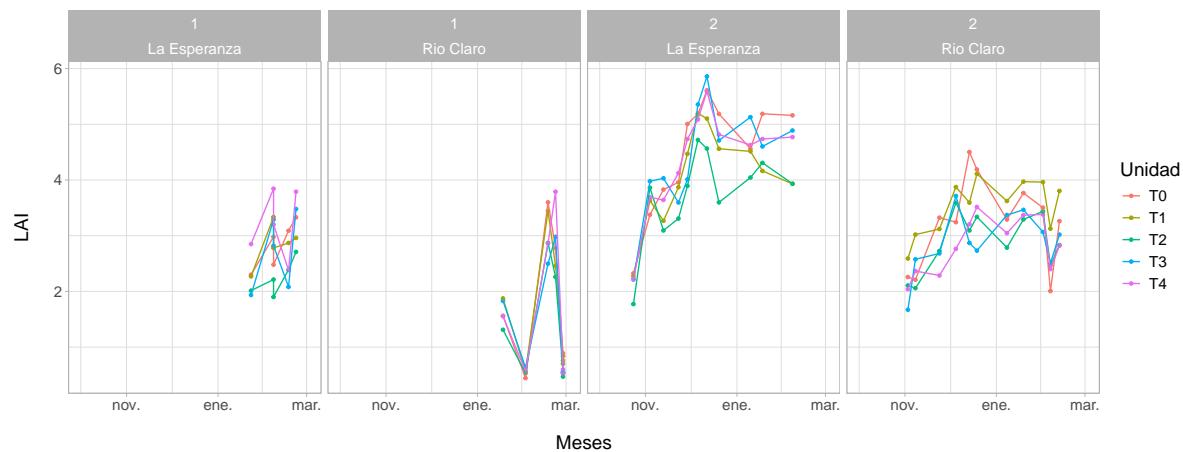
37 Por tratamiento



38 Por temporada

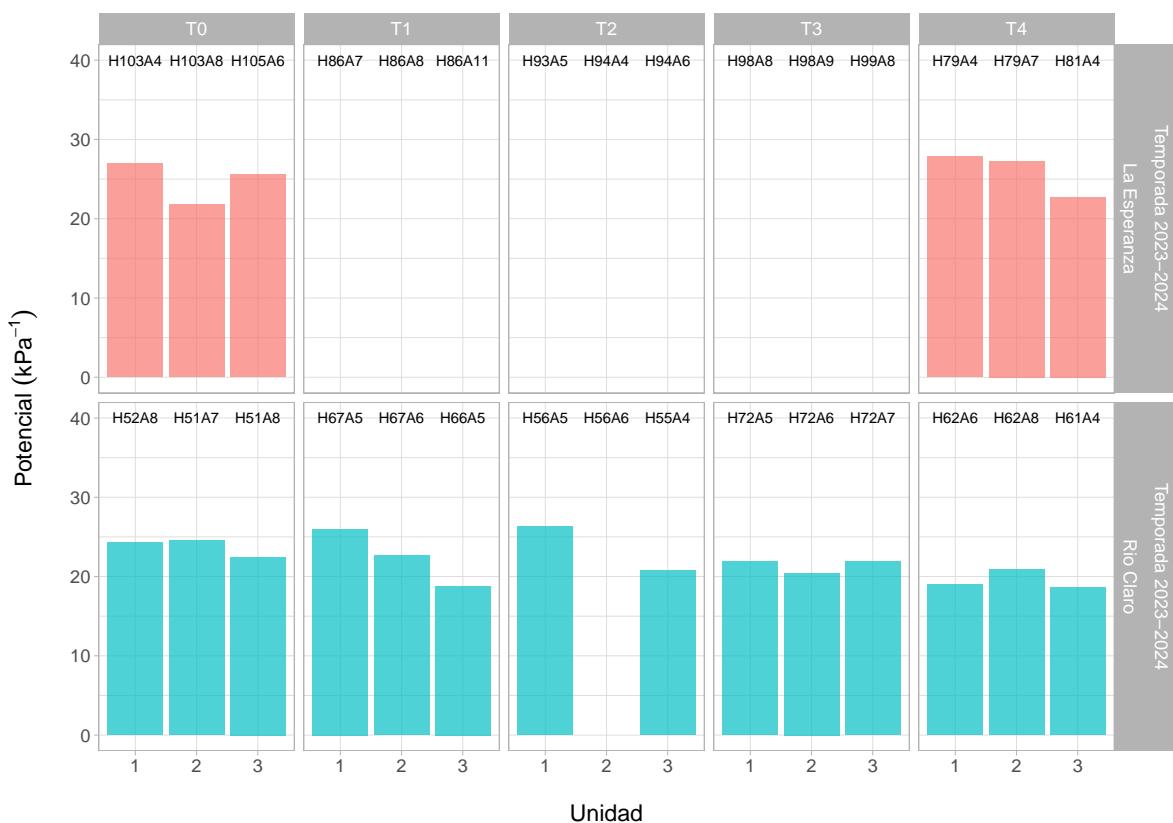


39 Serie temporal



40 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, como se describe en el anexo [Curvas Presión-Volumen](#).

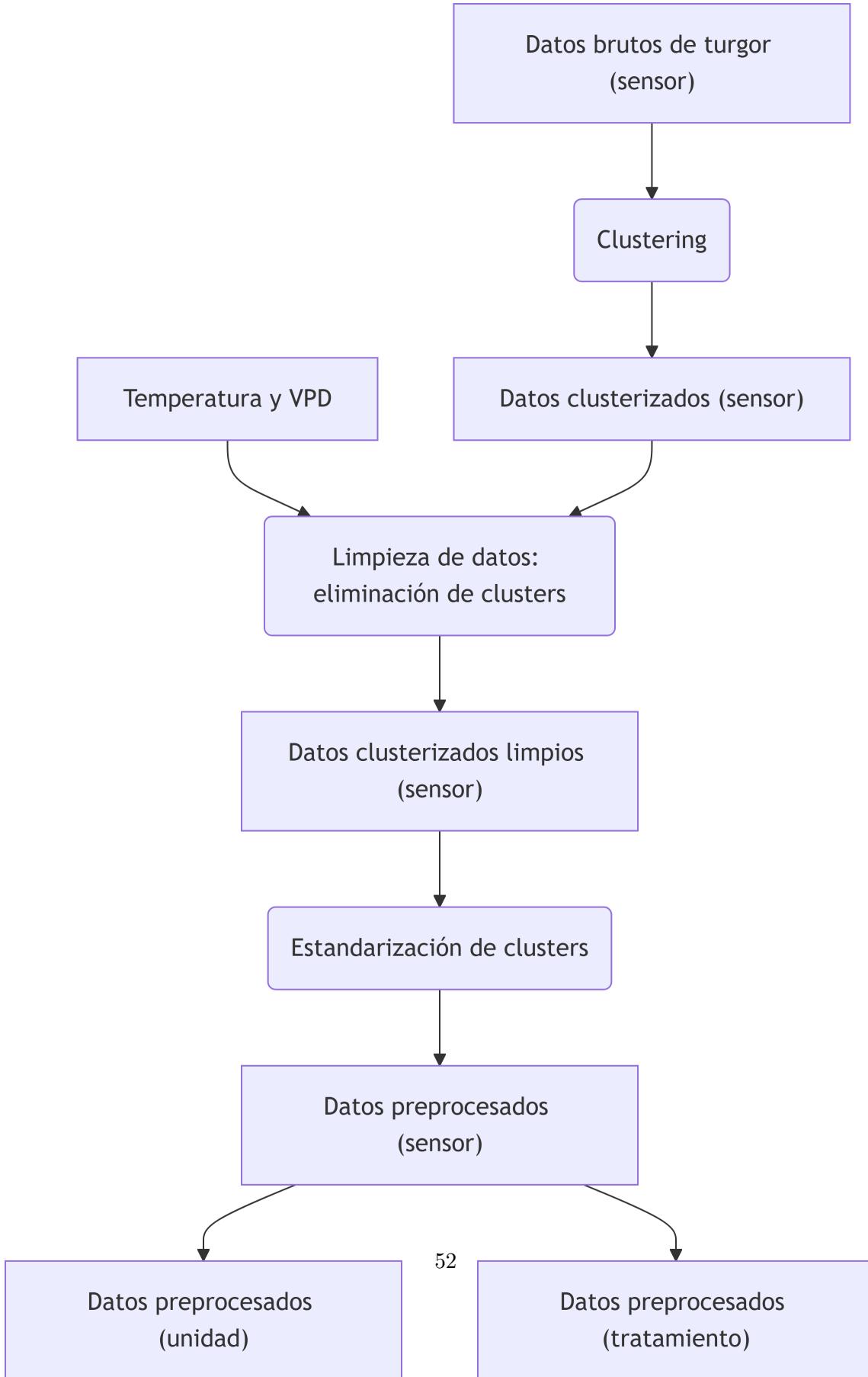


Parte IV

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.



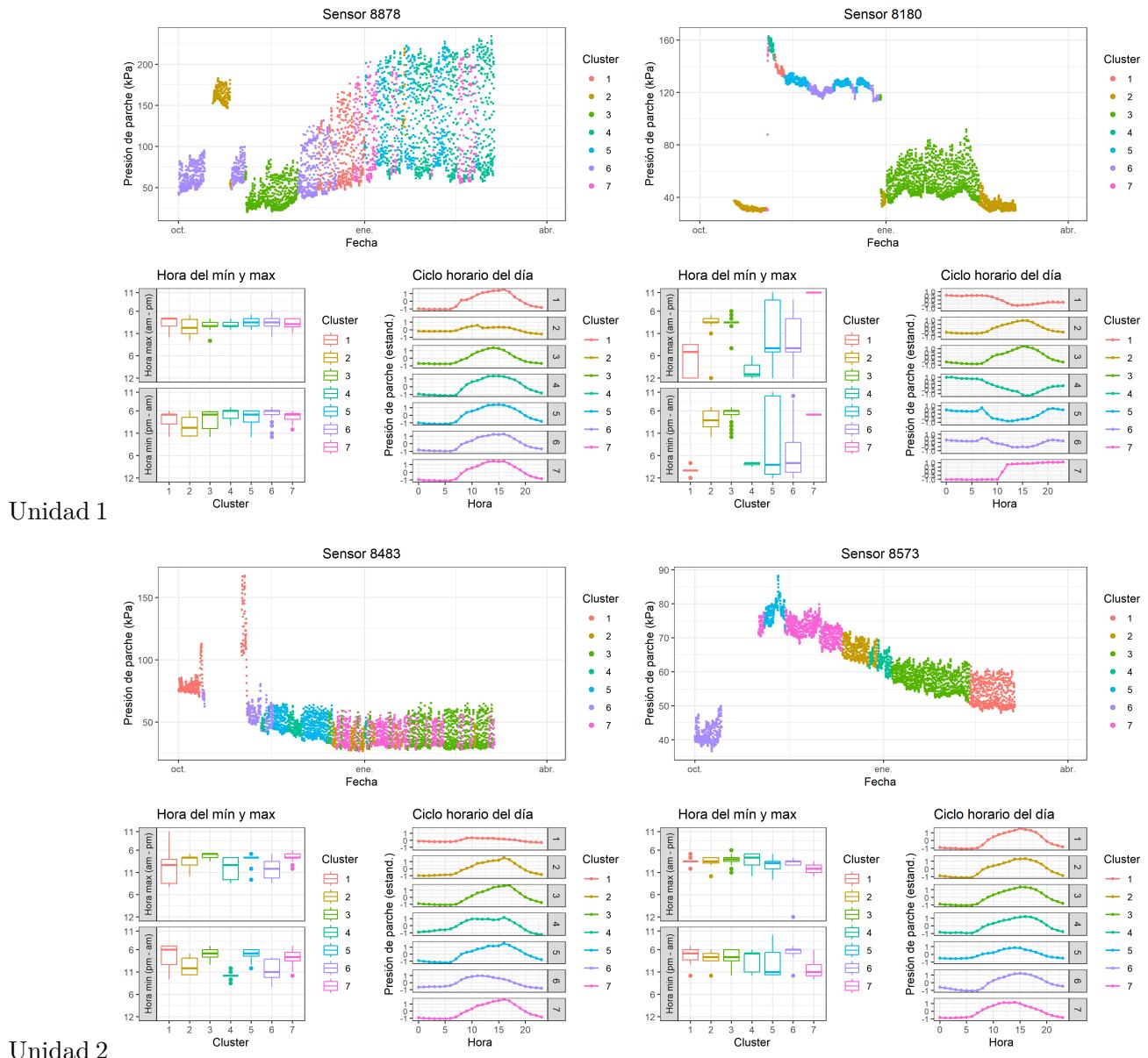
41 Clustering

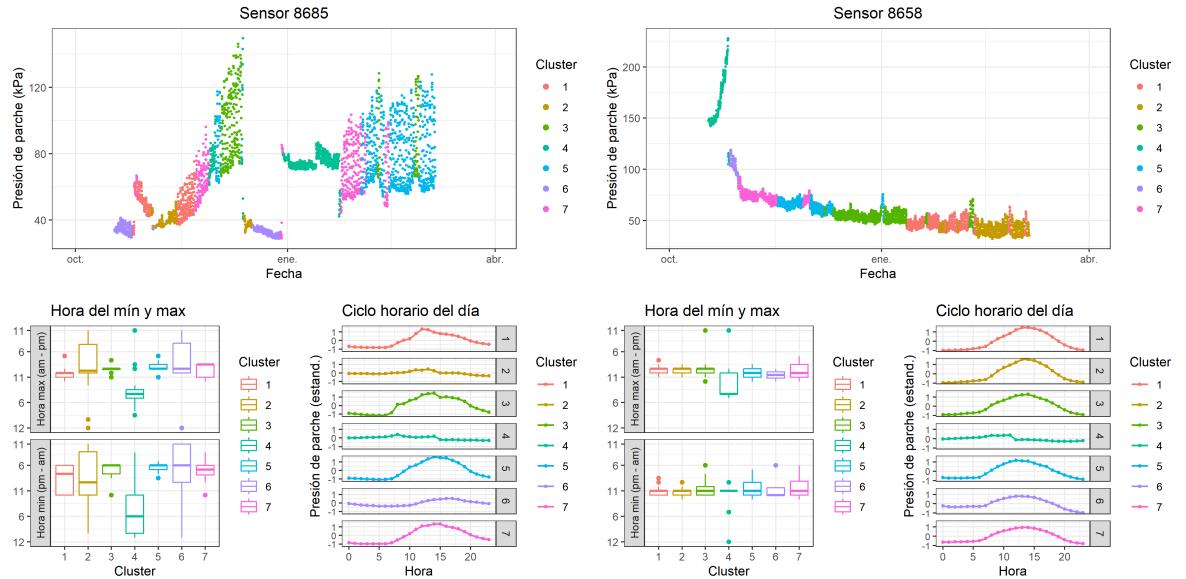
[Metodología de clustering].

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.

41.1 La Esperanza

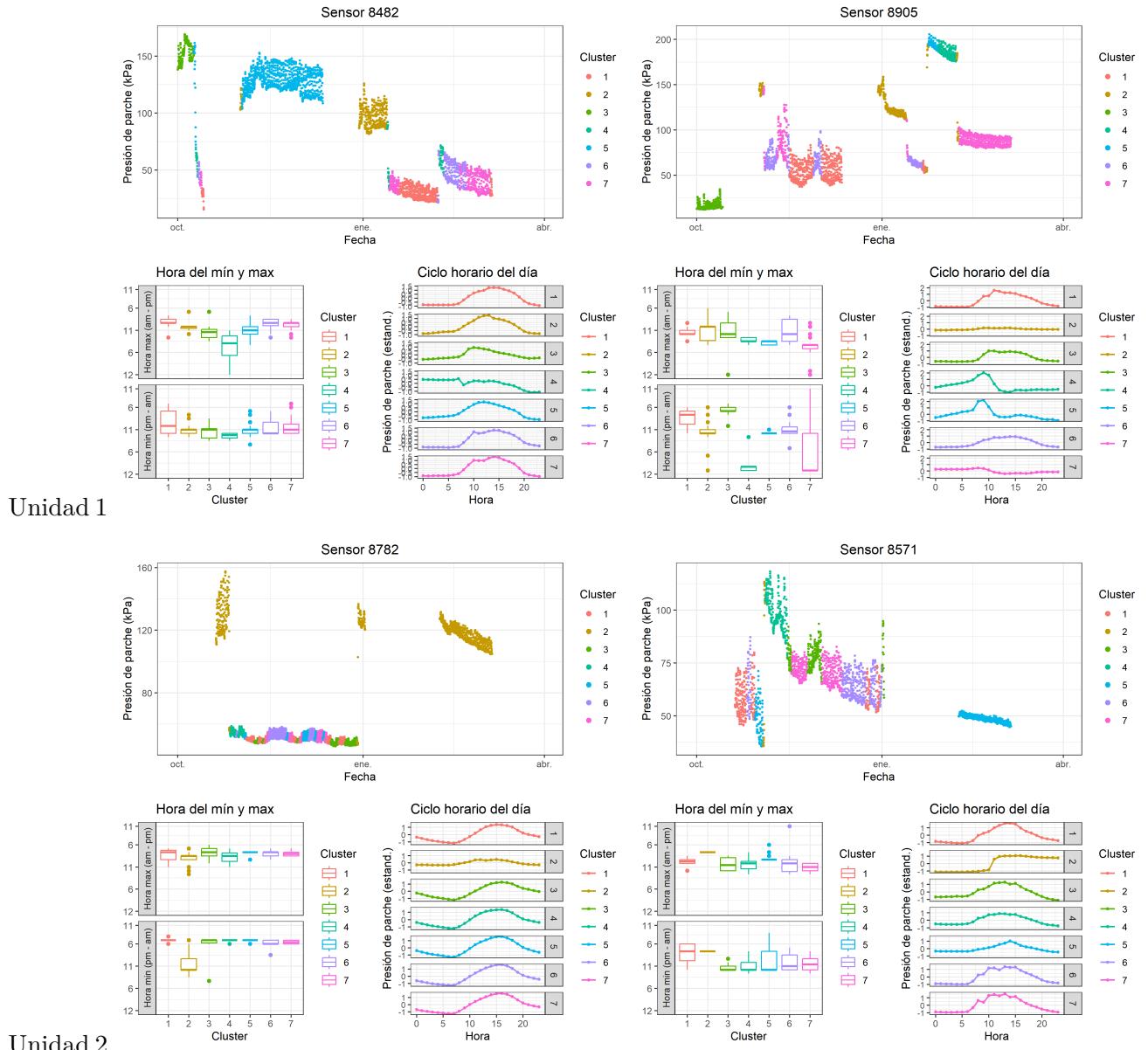
42 T1 (2022-2023)

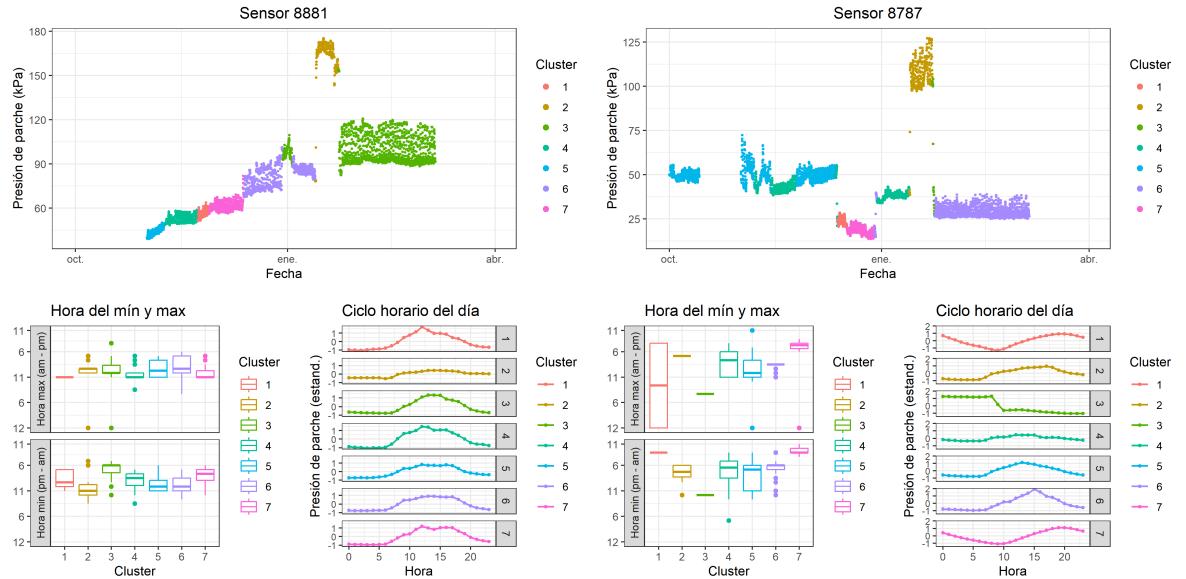




Unidad 3

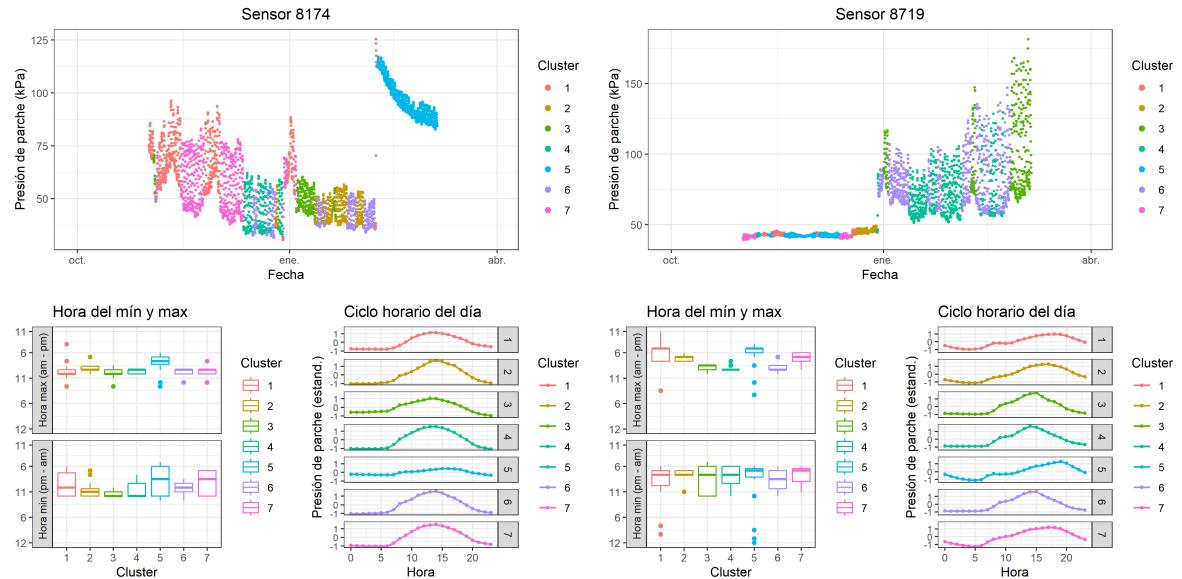
43 T2 (2022-2023)



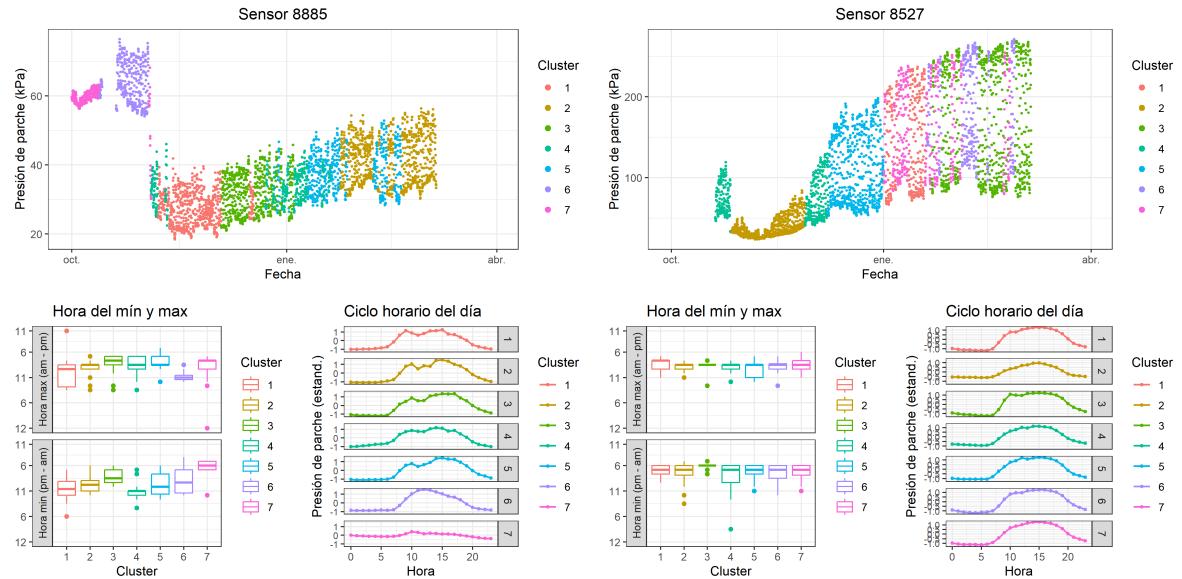


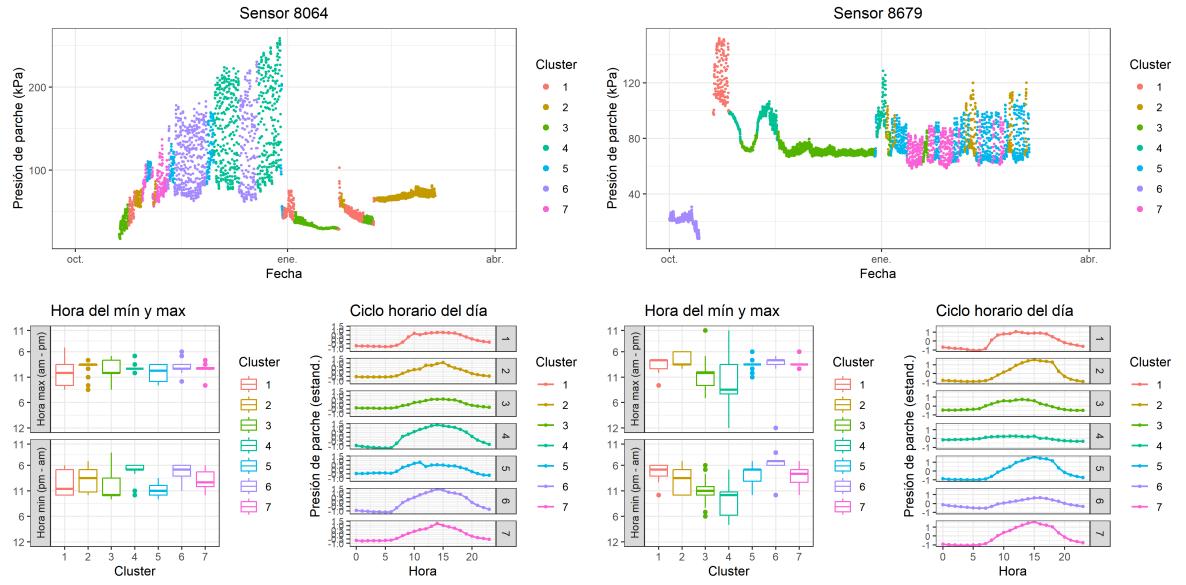
Unidad 3

44 T3 (2022-2023)



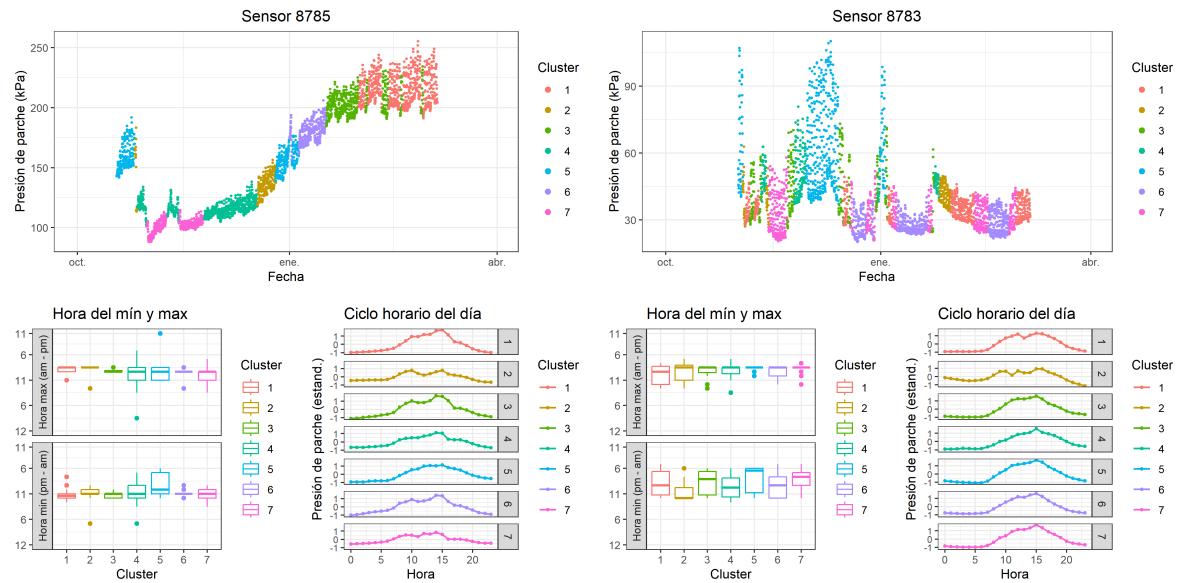
Unidad 1



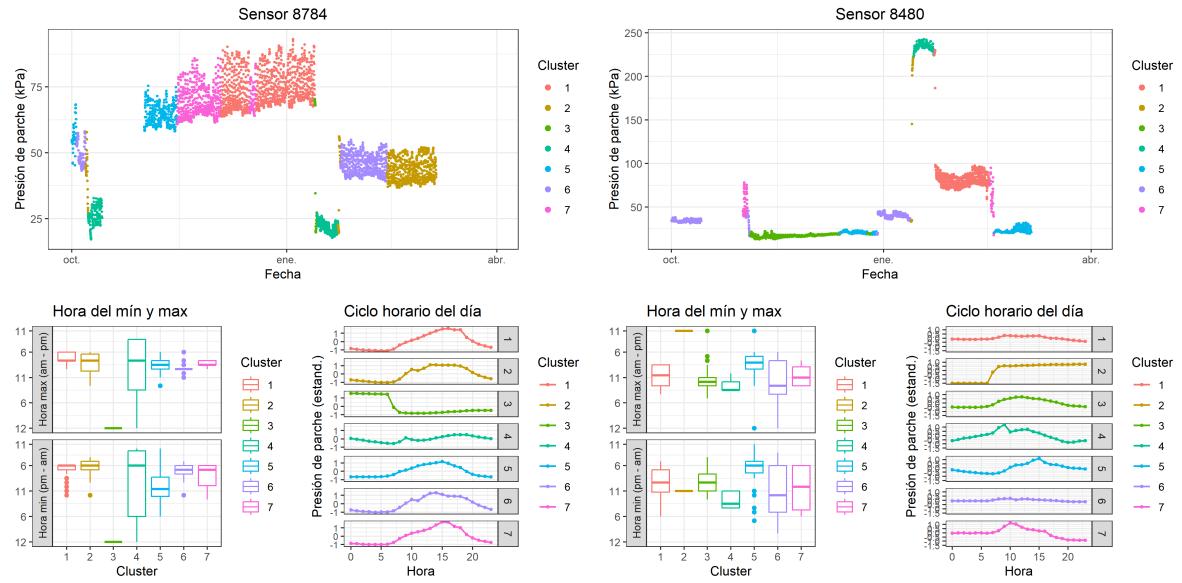


Unidad 3

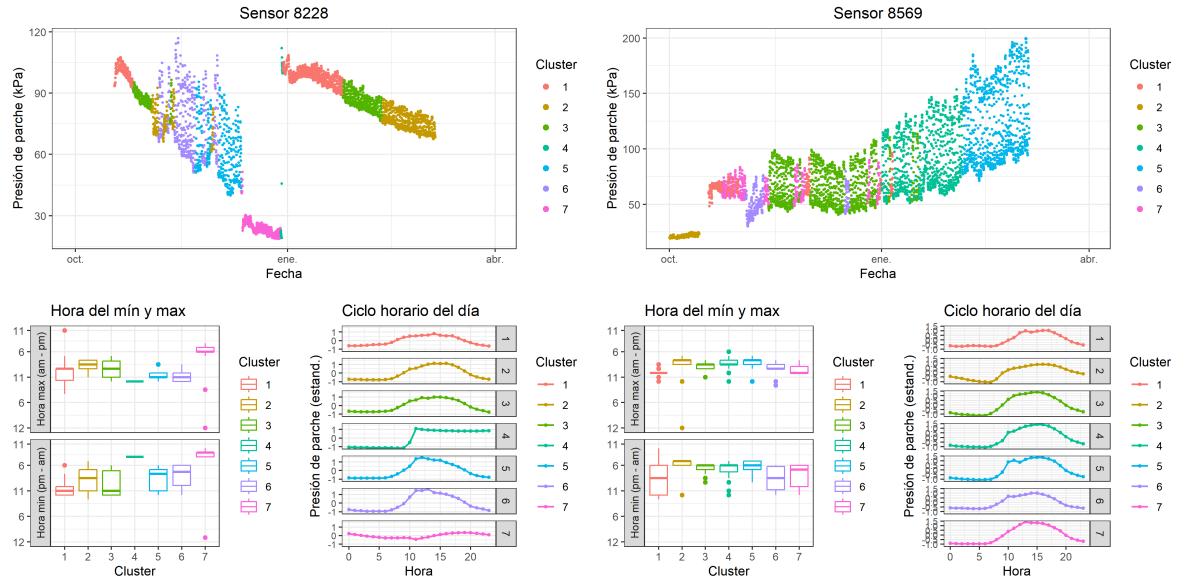
45 T4 (2022-2023)



Unidad 1

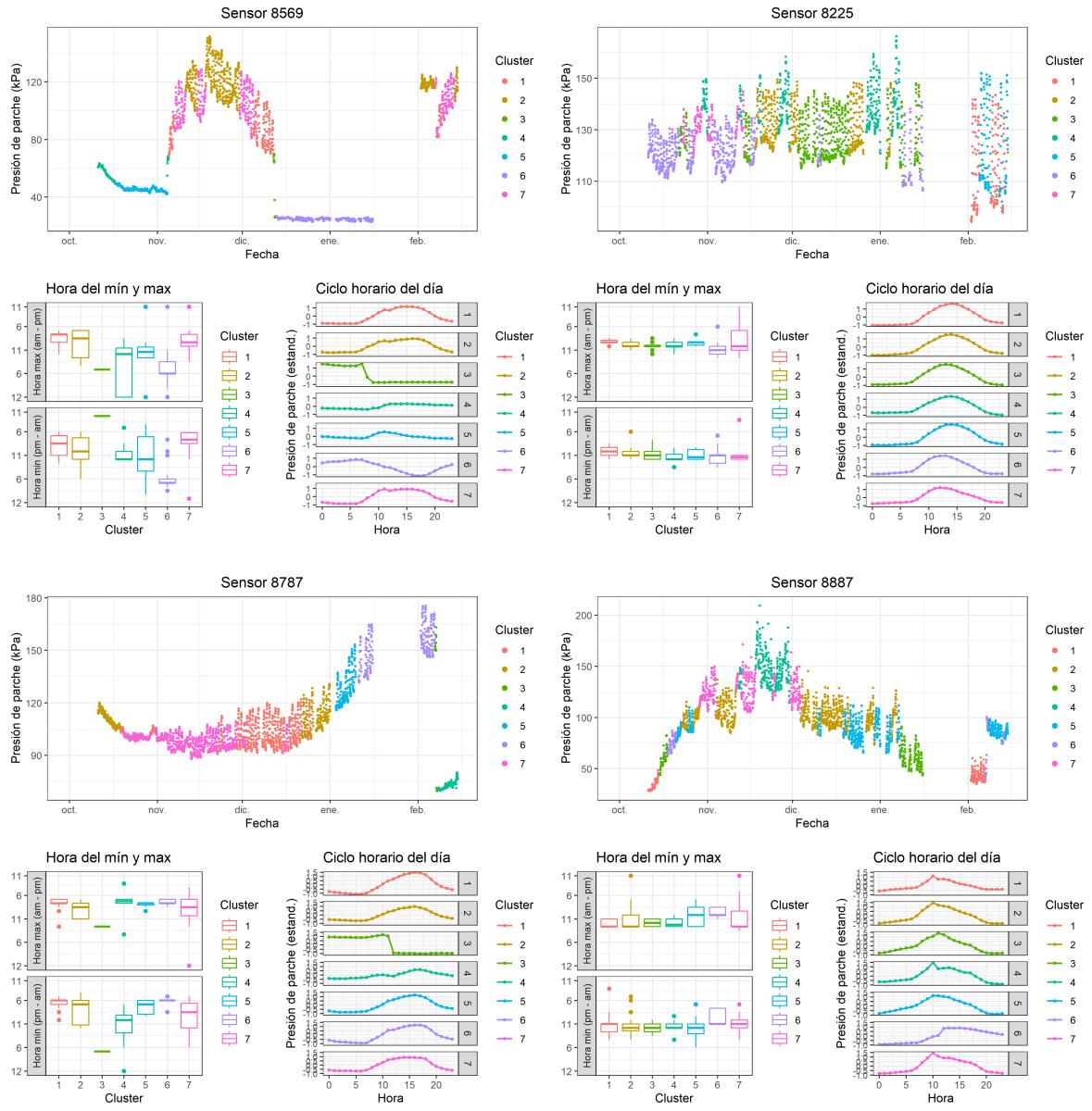


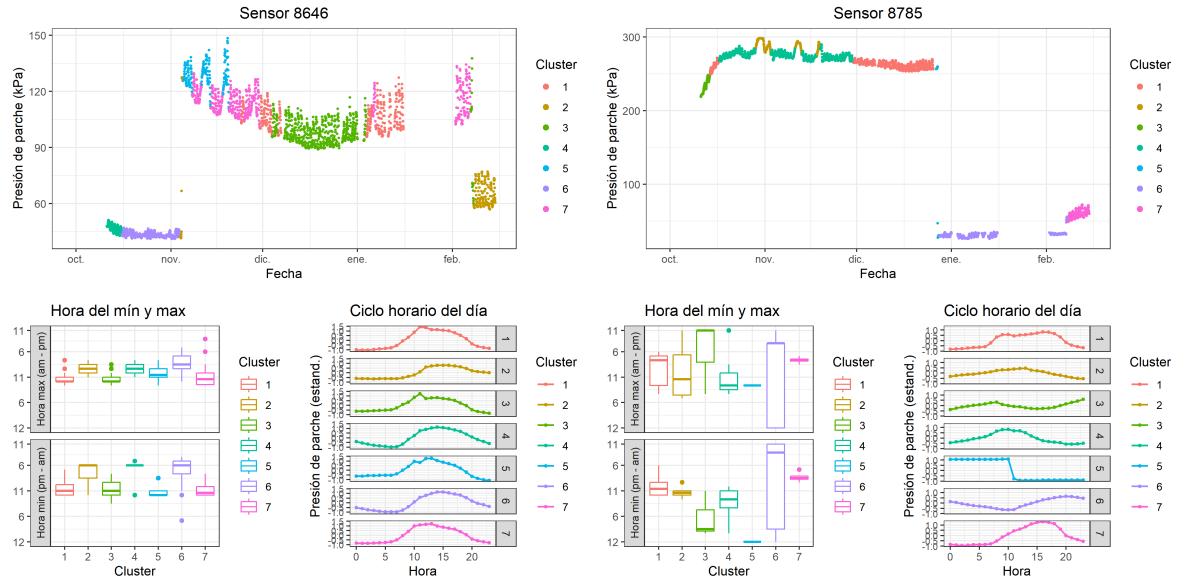
Unidad 2



Unidad 3

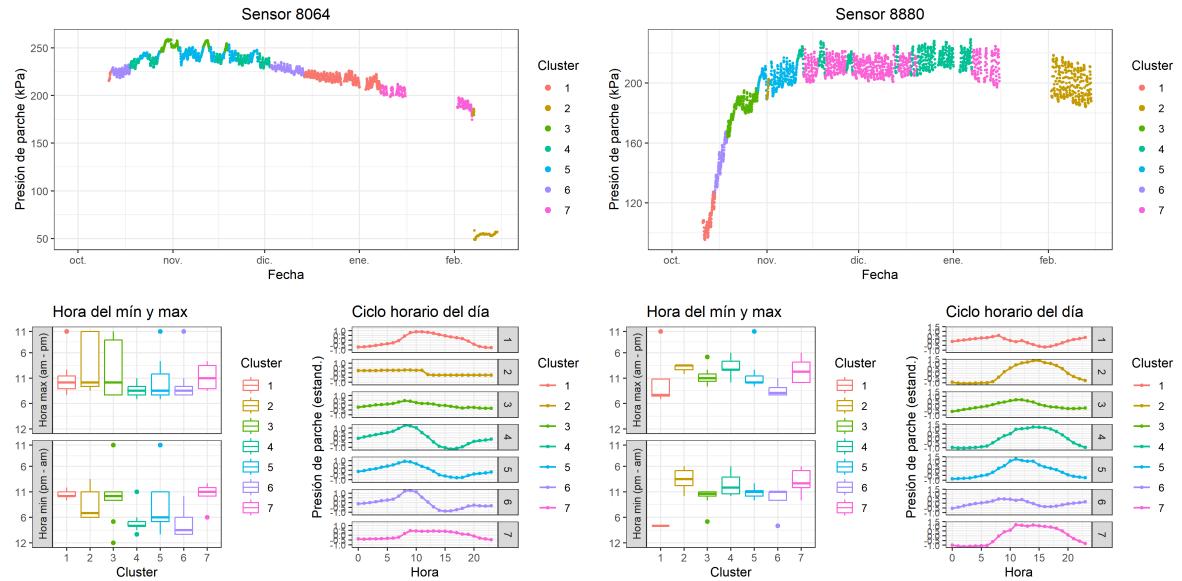
46 T1 (2023-2024)



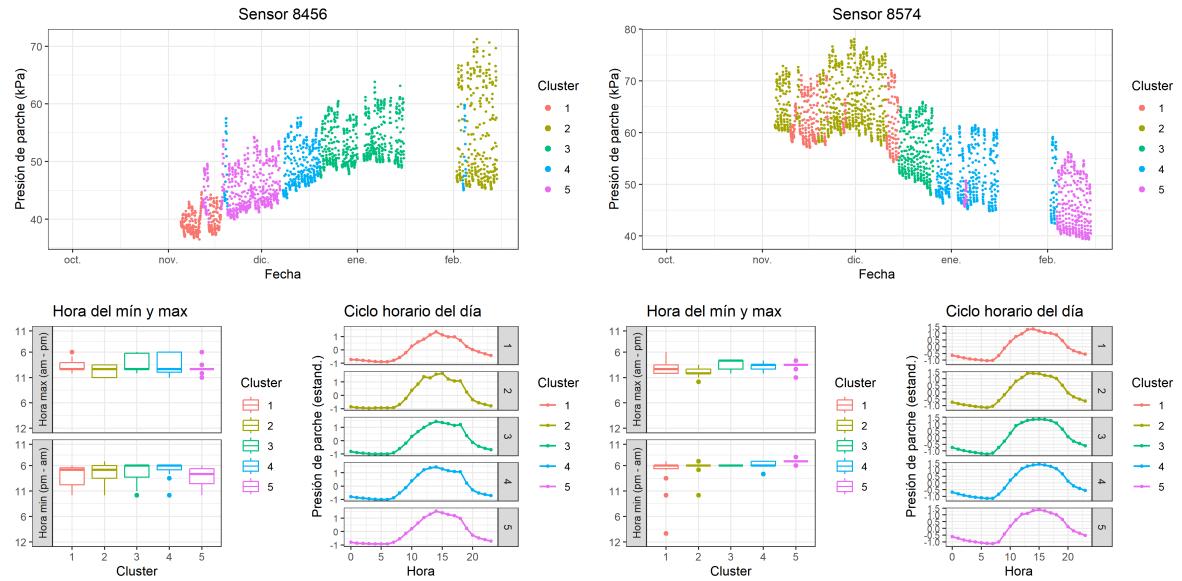


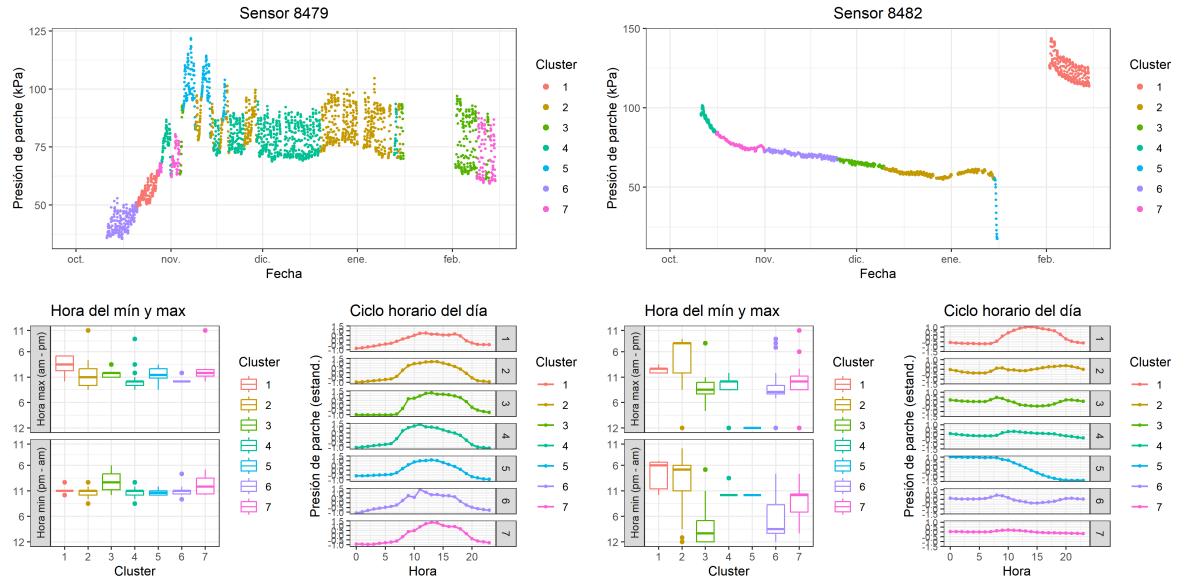
Unidad 3

47 T2 (2023-2024)



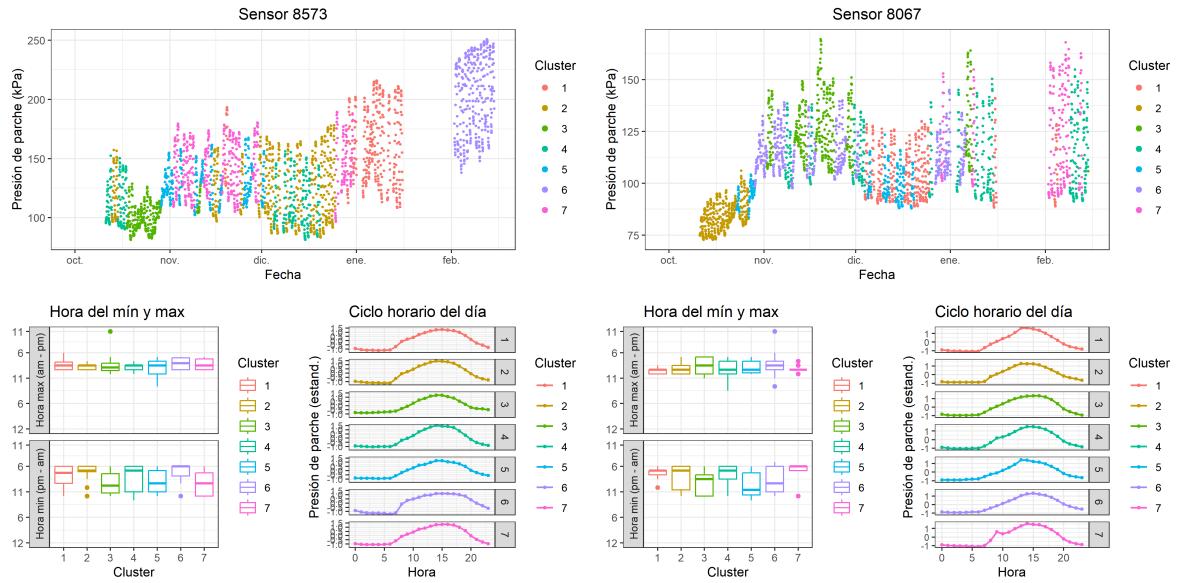
Unidad 1



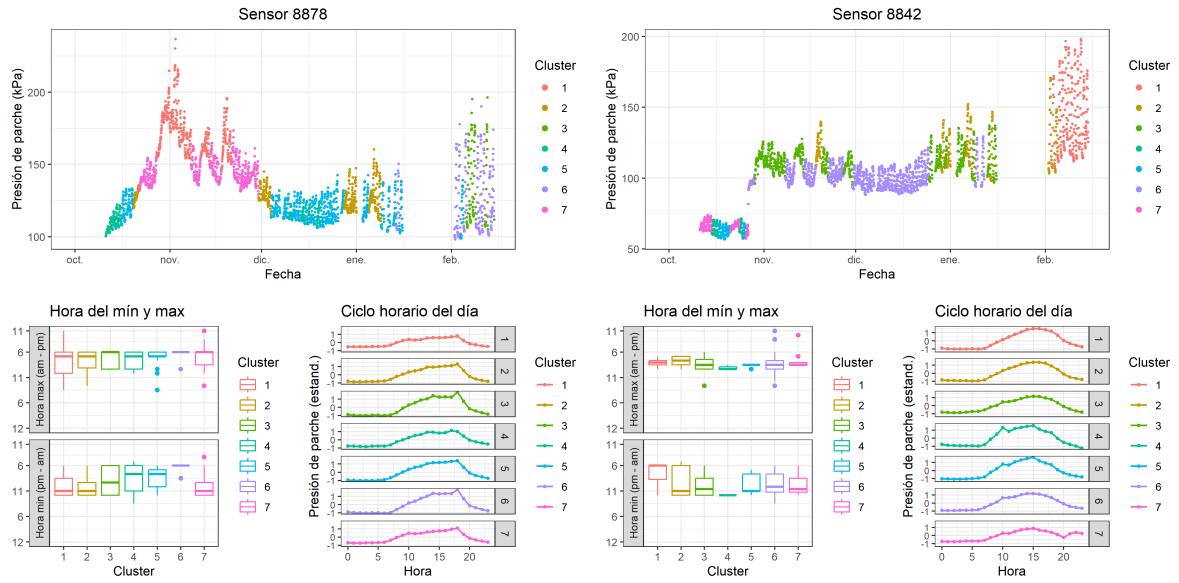


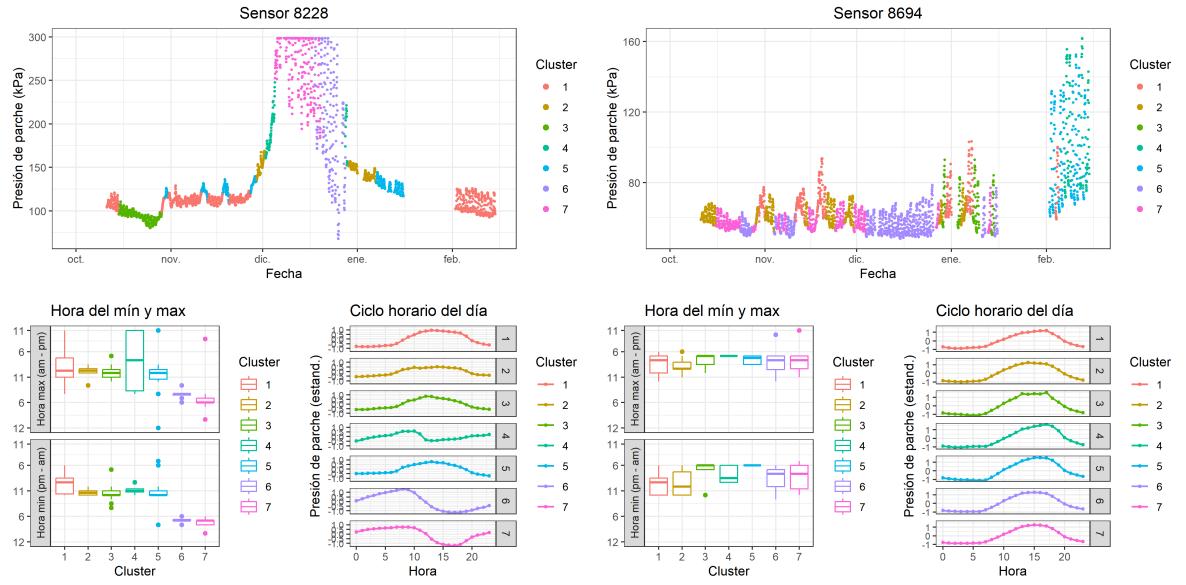
Unidad 3

48 T3 (2023-2024)



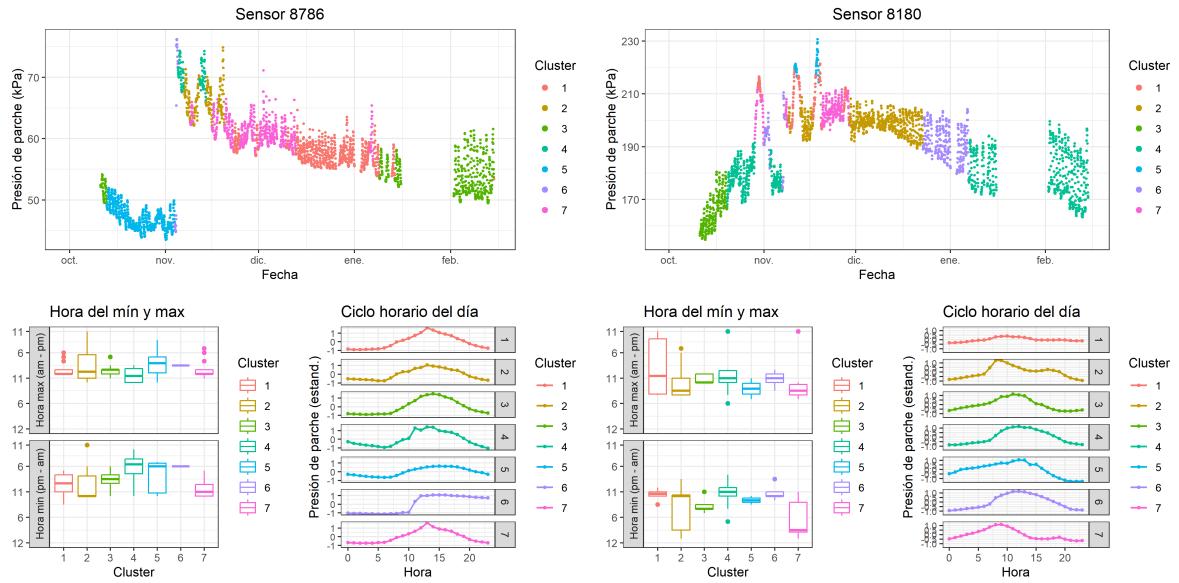
Unidad 1



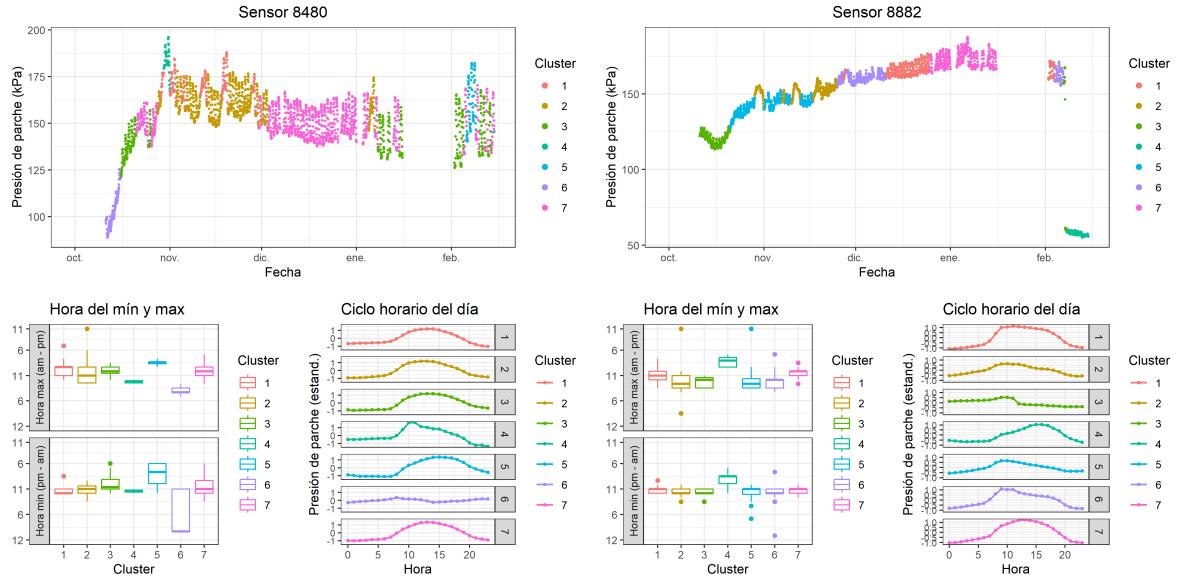


Unidad 3

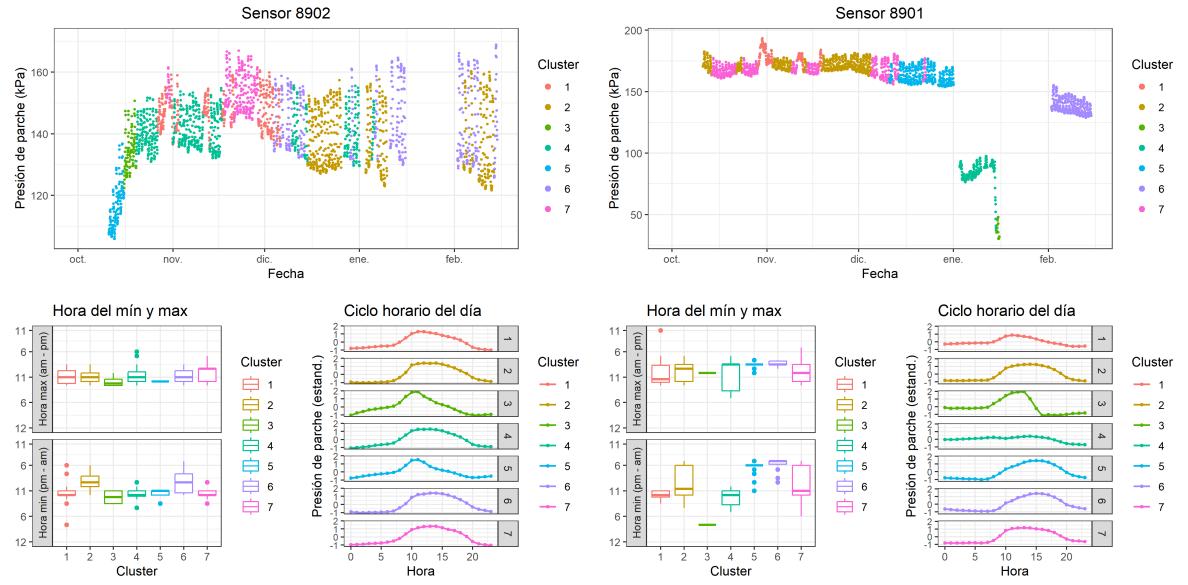
49 T4 (2023-2024)



Unidad 1



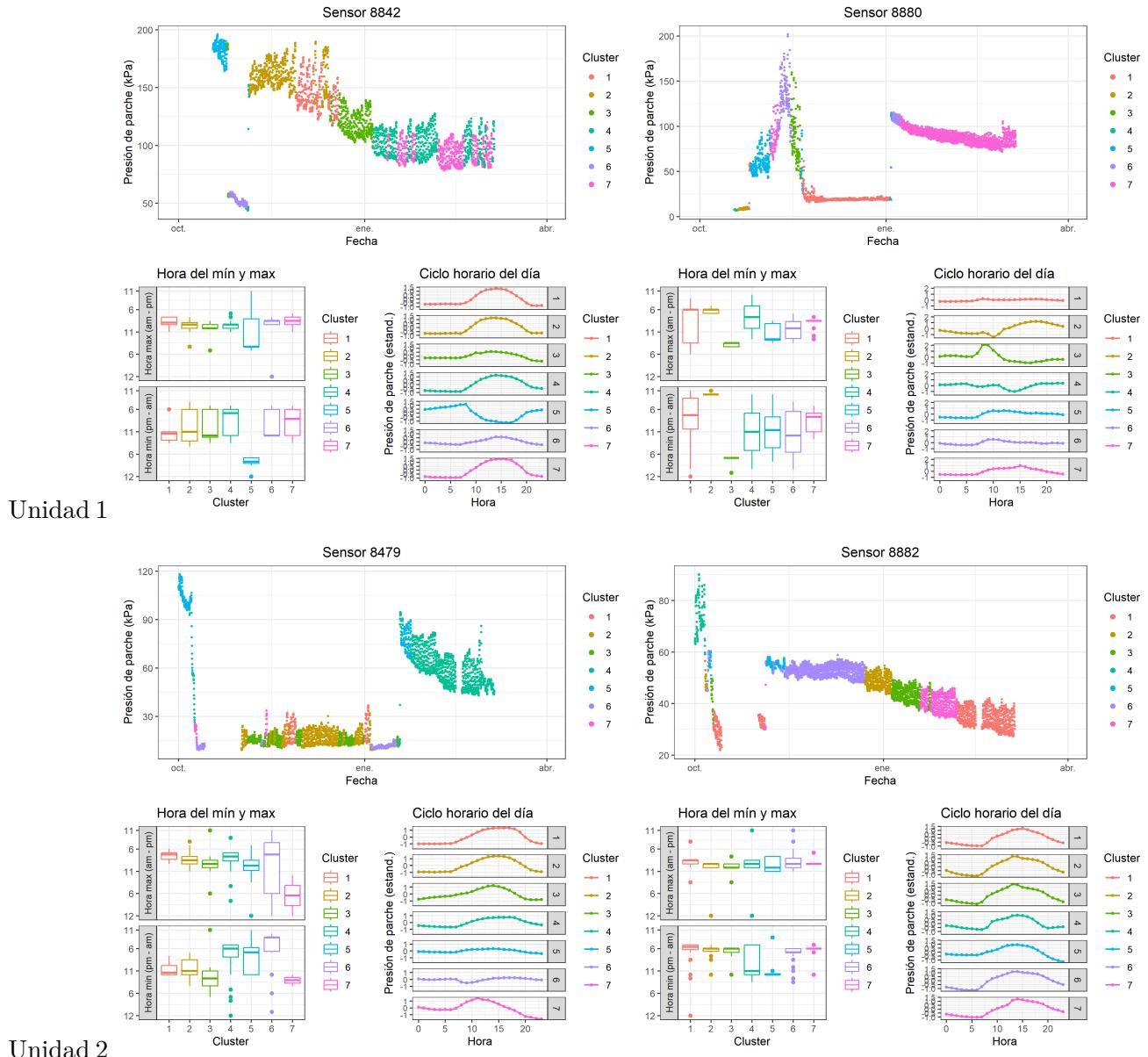
Unidad 2

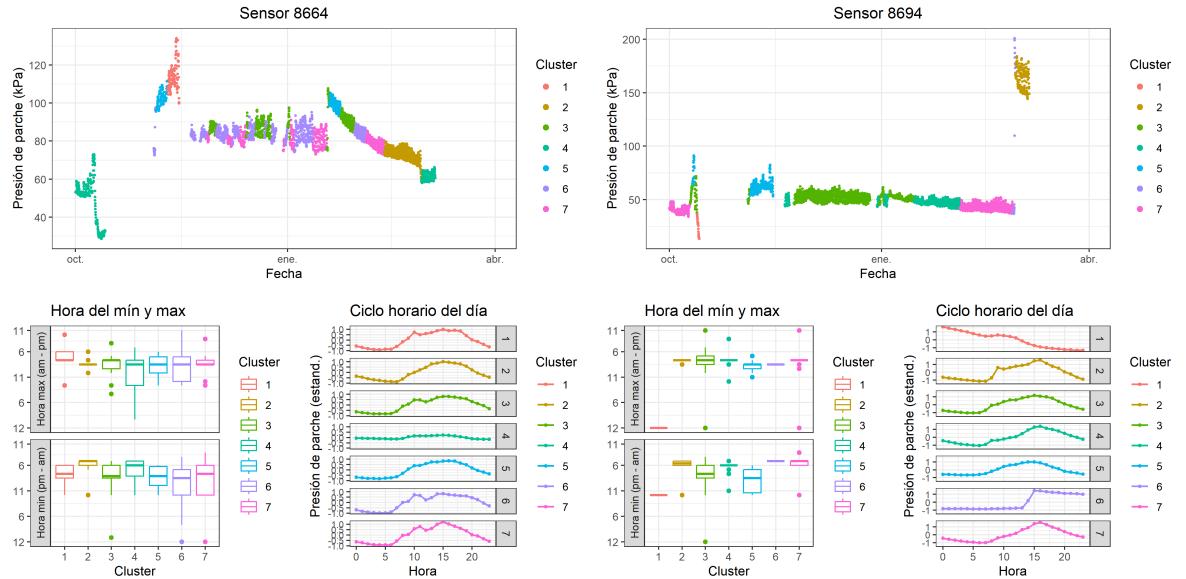


Unidad 3

49.1 Rio Claro

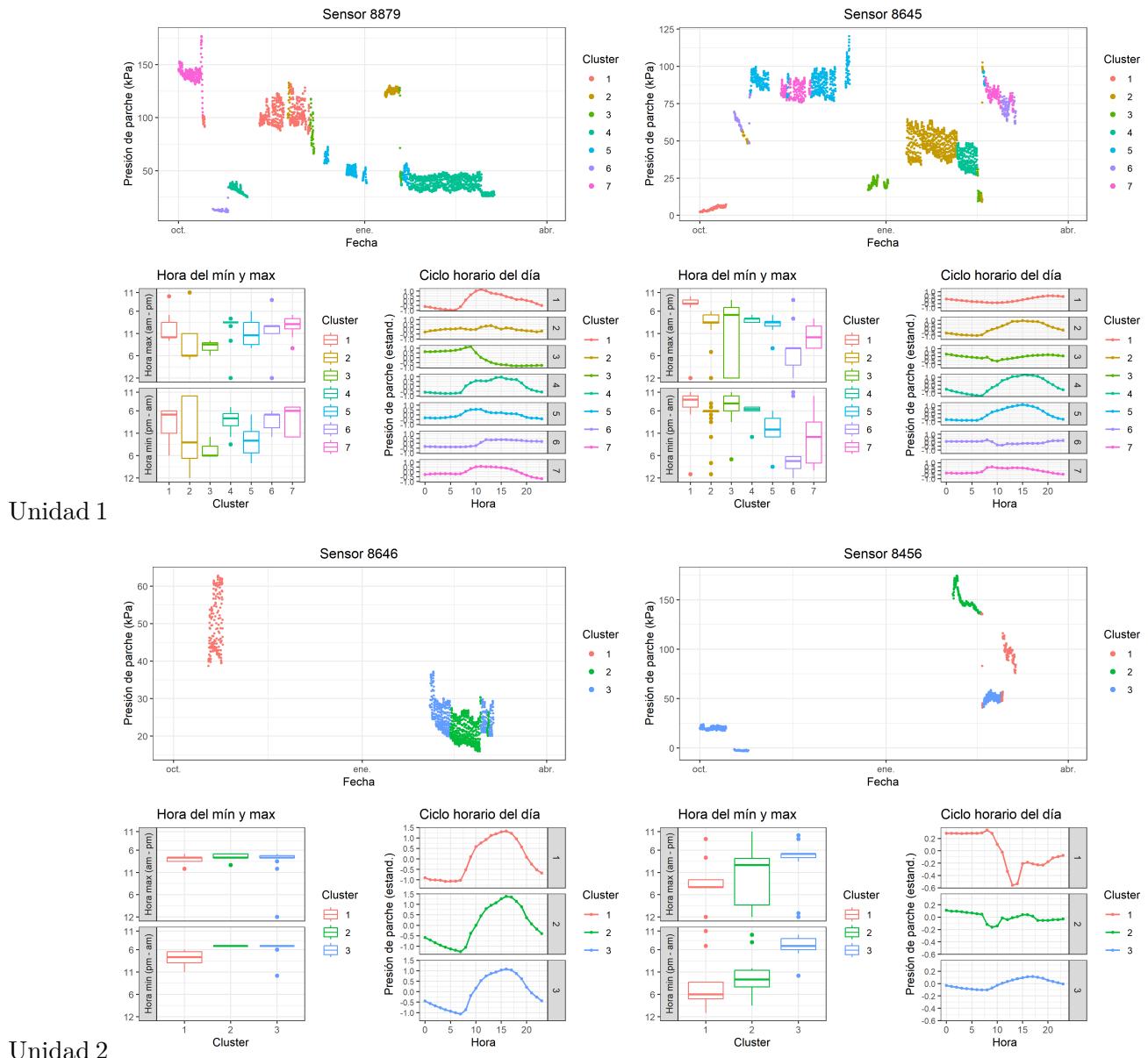
50 T1 (2022-2023)

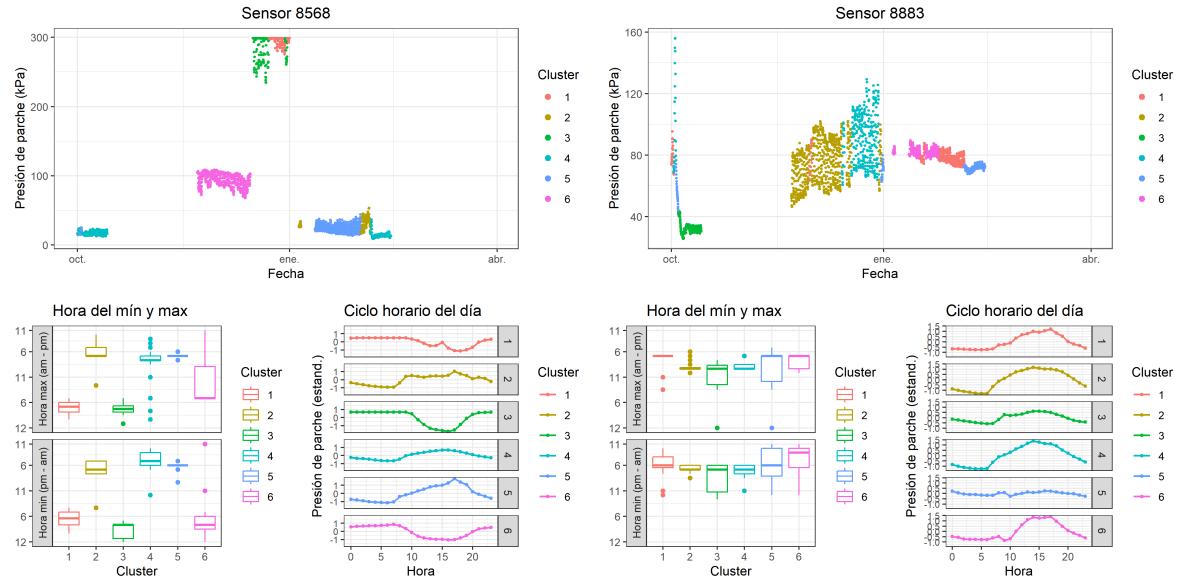




Unidad 3

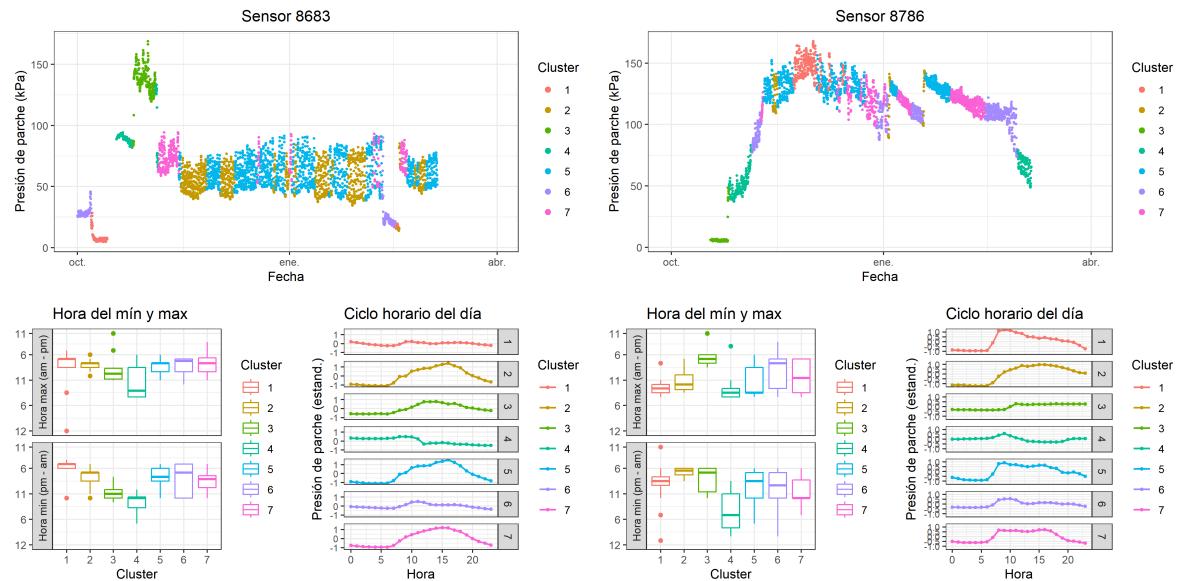
51 T2 (2022-2023)



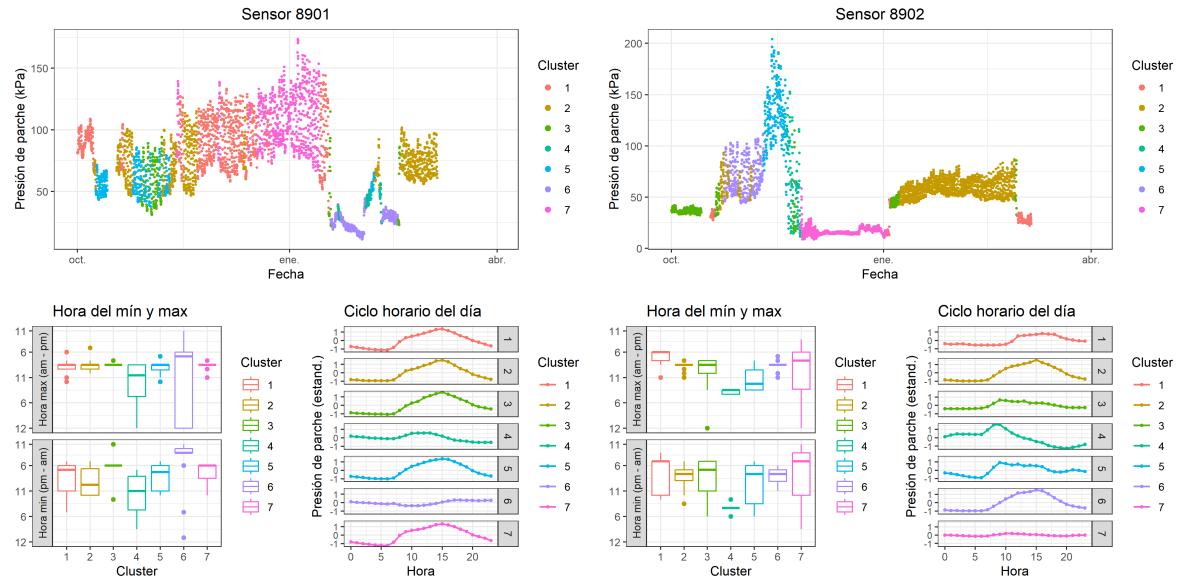


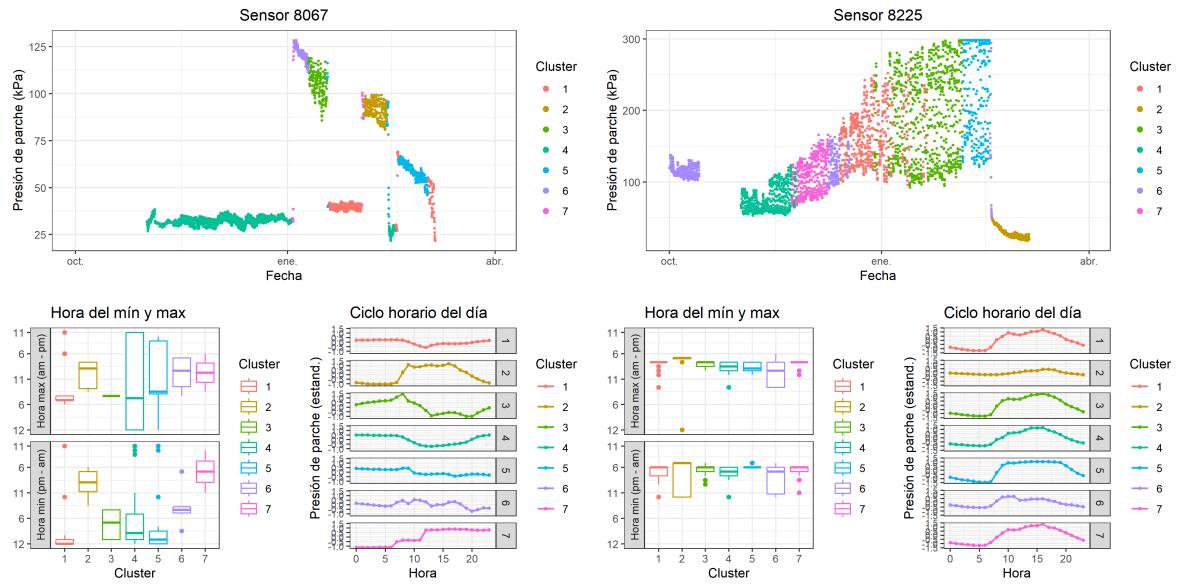
Unidad 3

52 T3 (2022-2023)



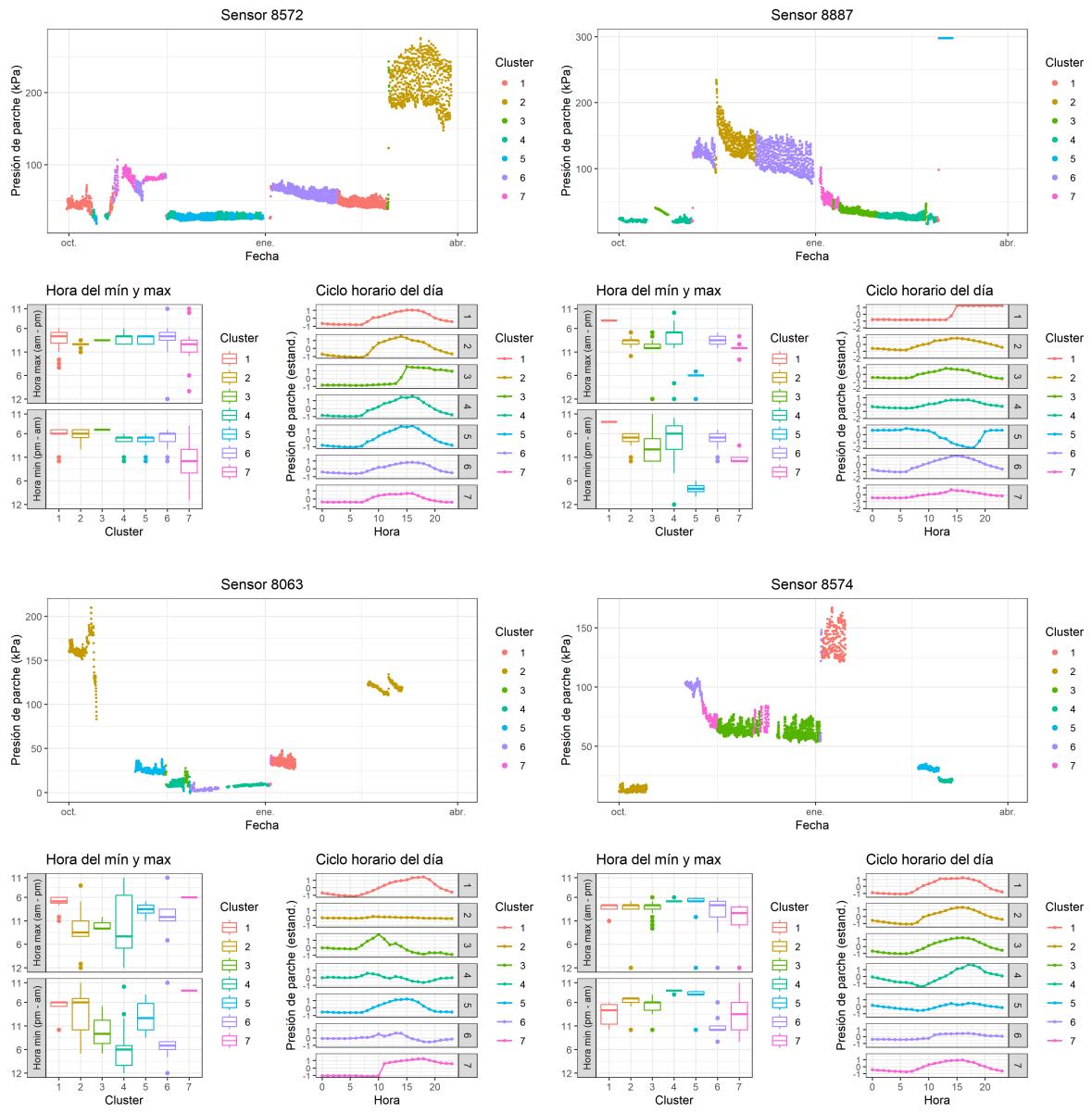
Unidad 1

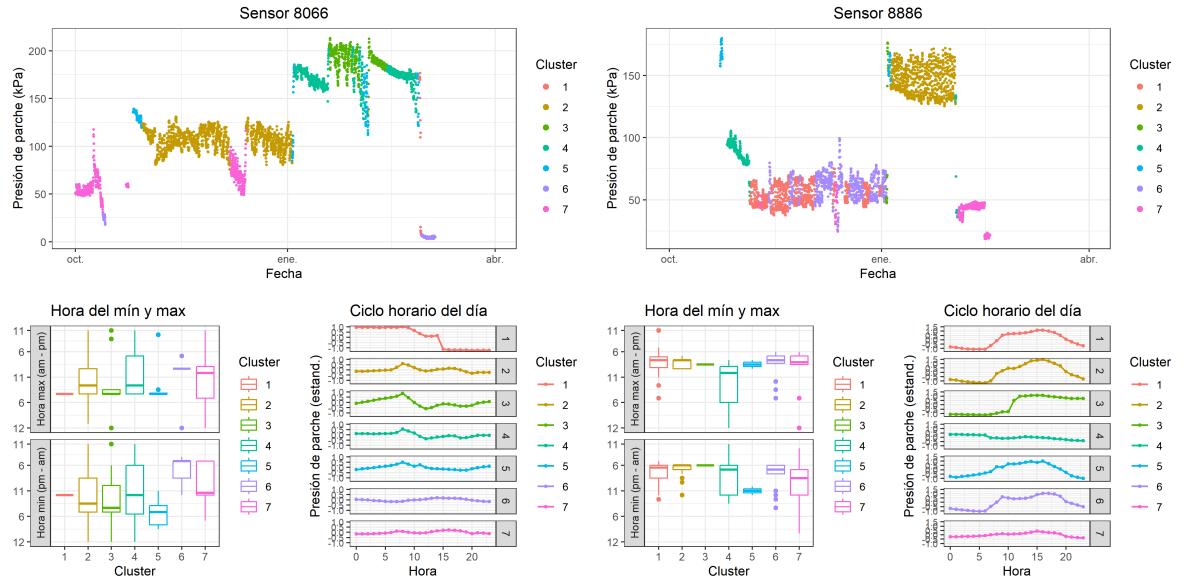




Unidad 3

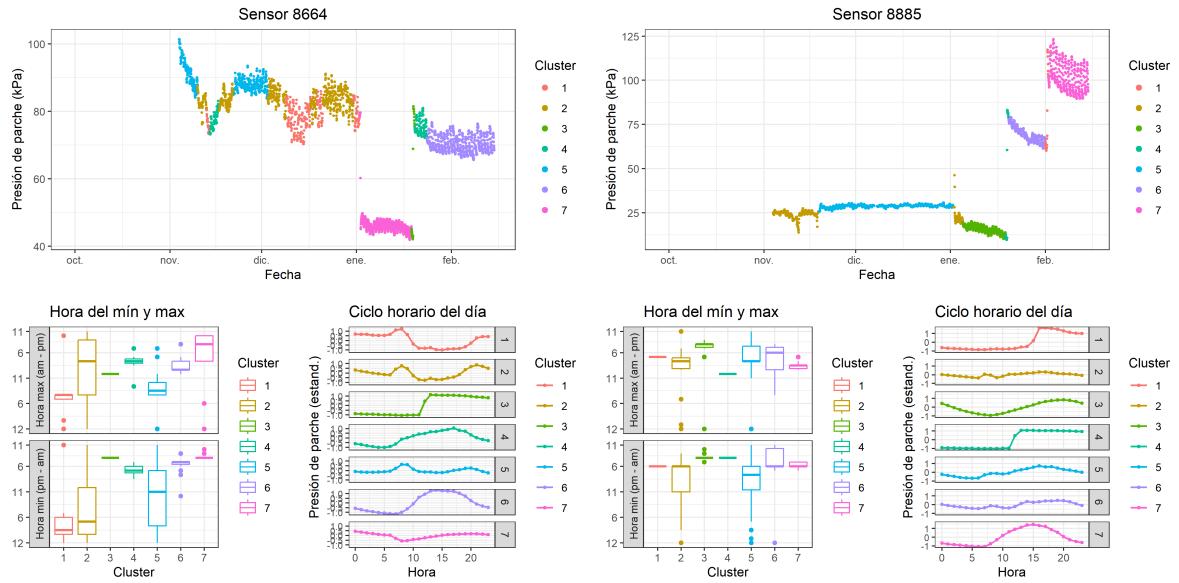
53 T4 (2022-2023)



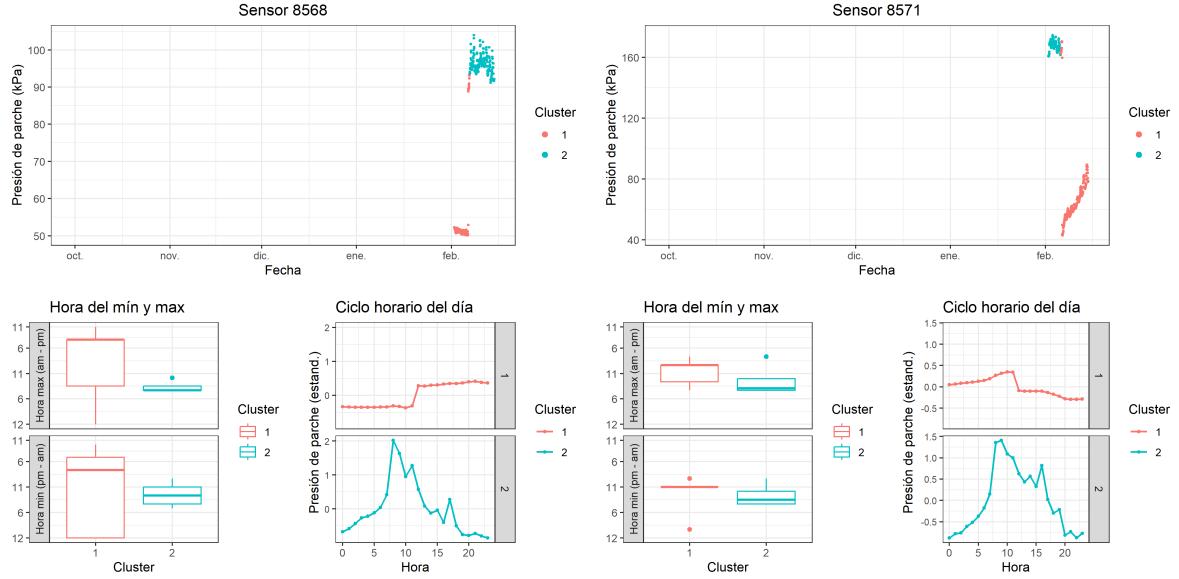


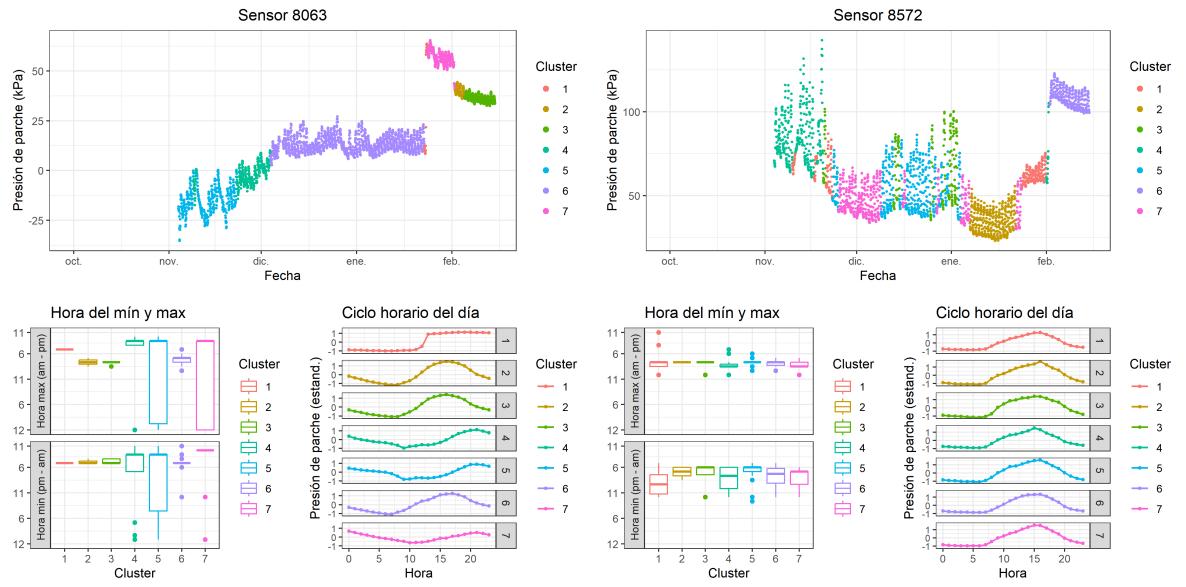
Unidad 3

54 T1 (2023-2024)



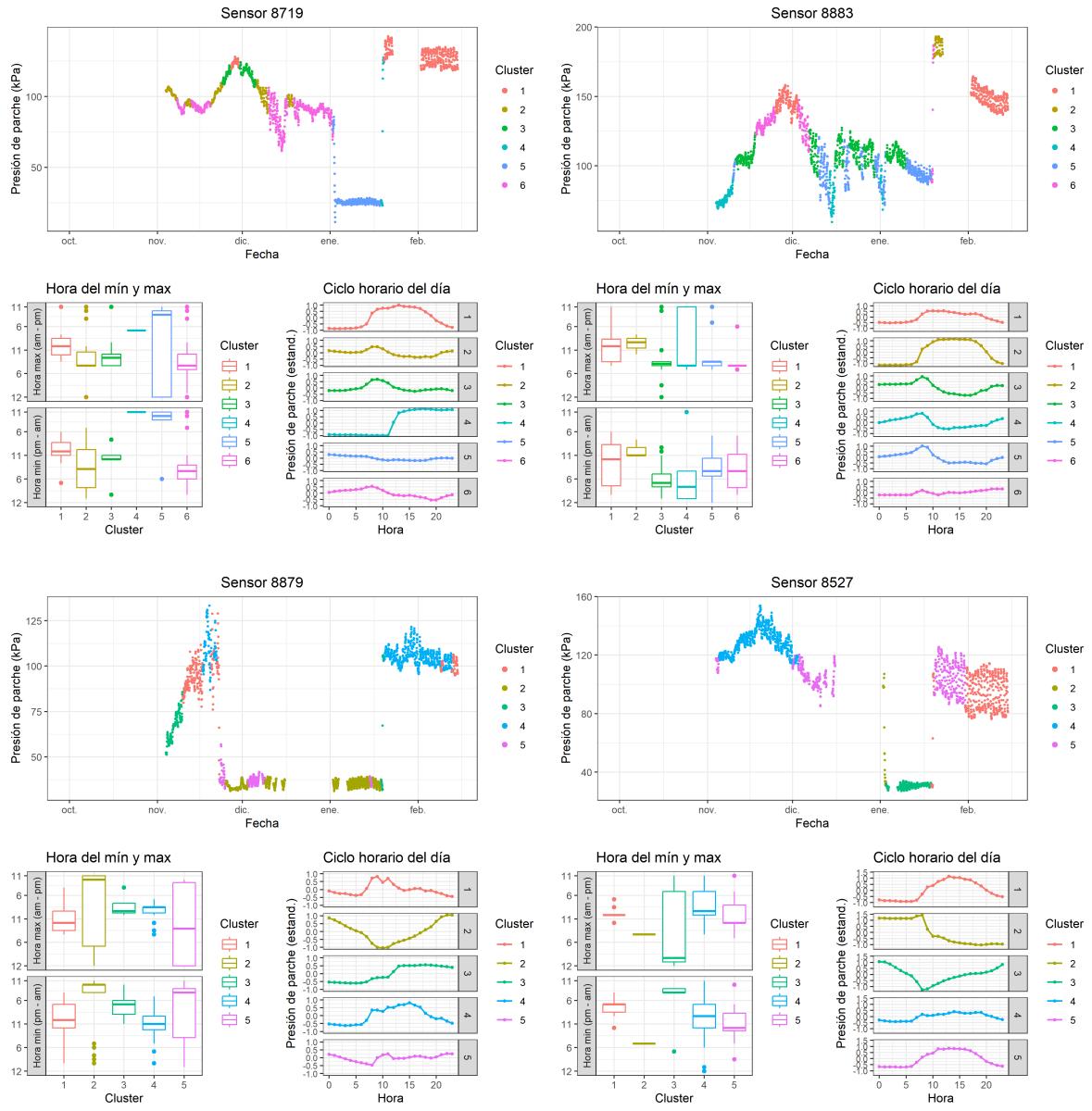
Unidad 1

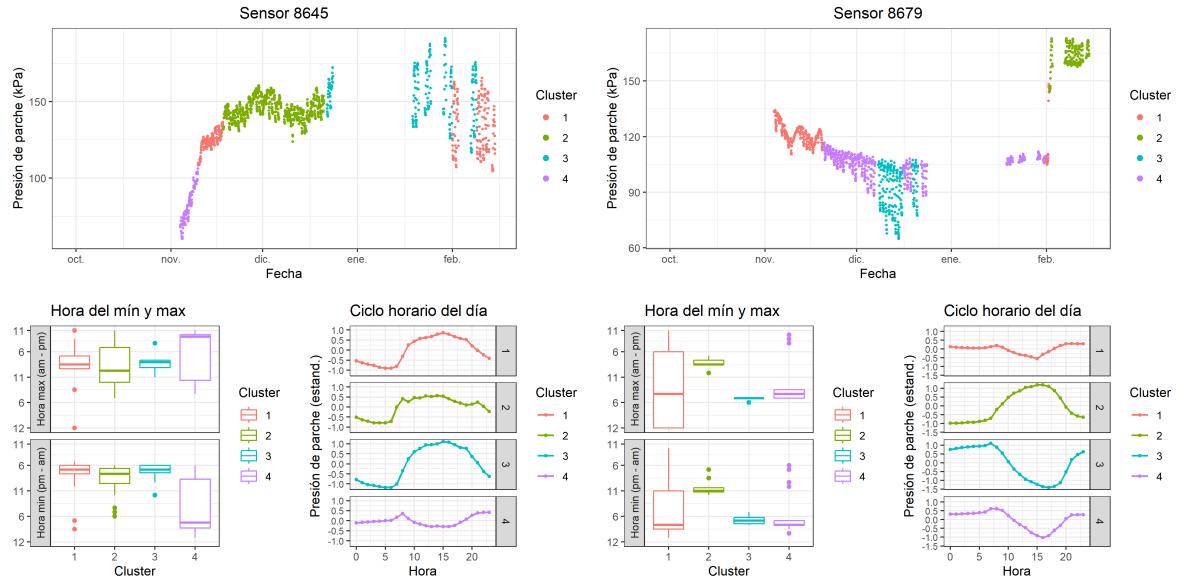




Unidad 3

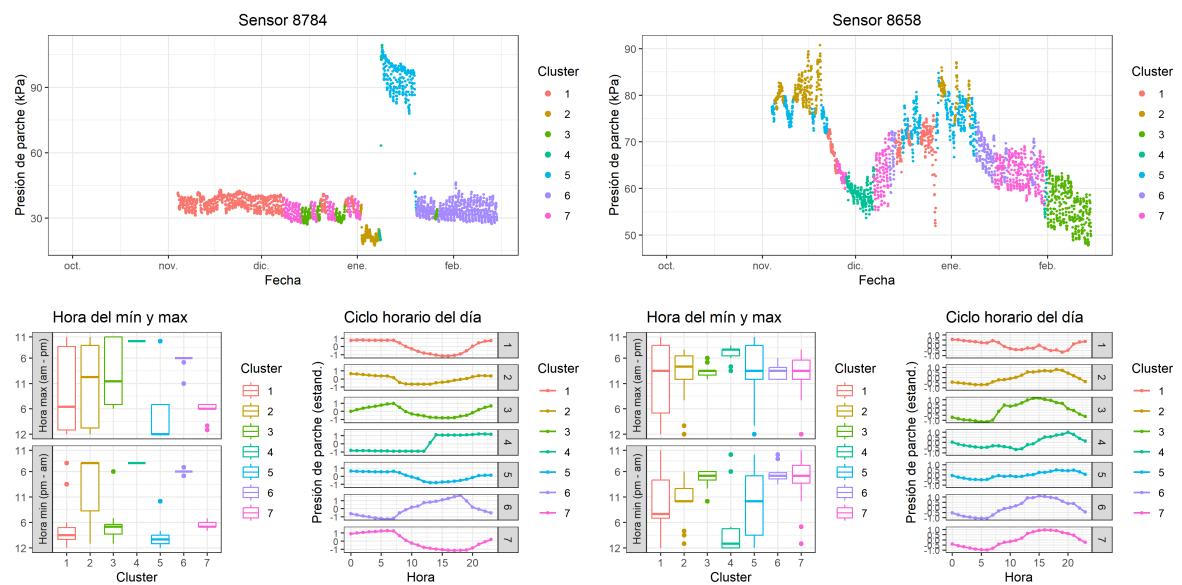
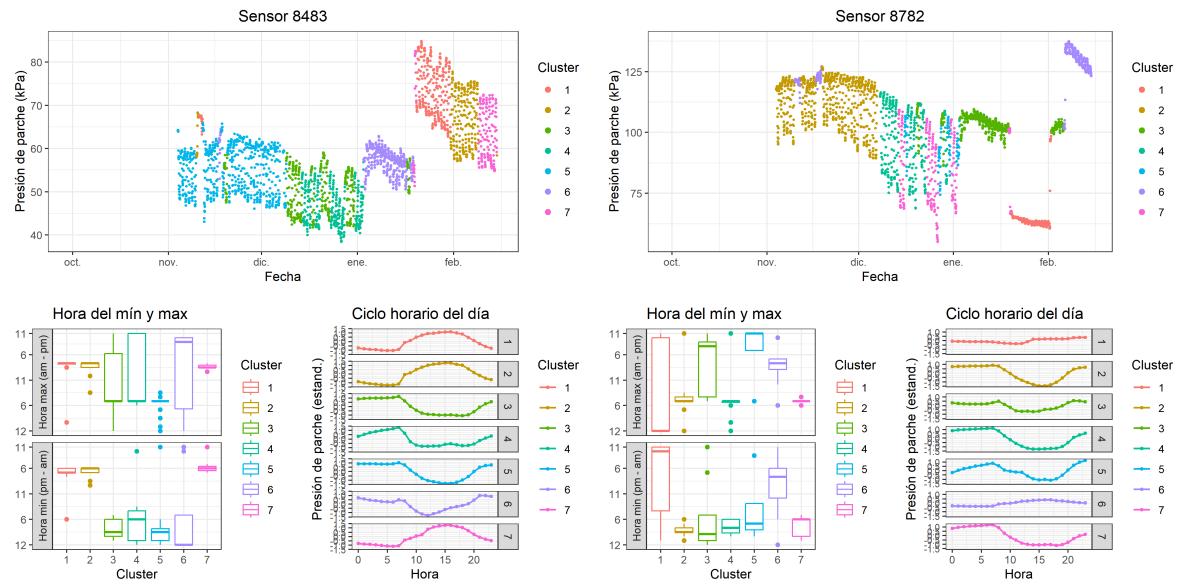
55 T2 (2023-2024)

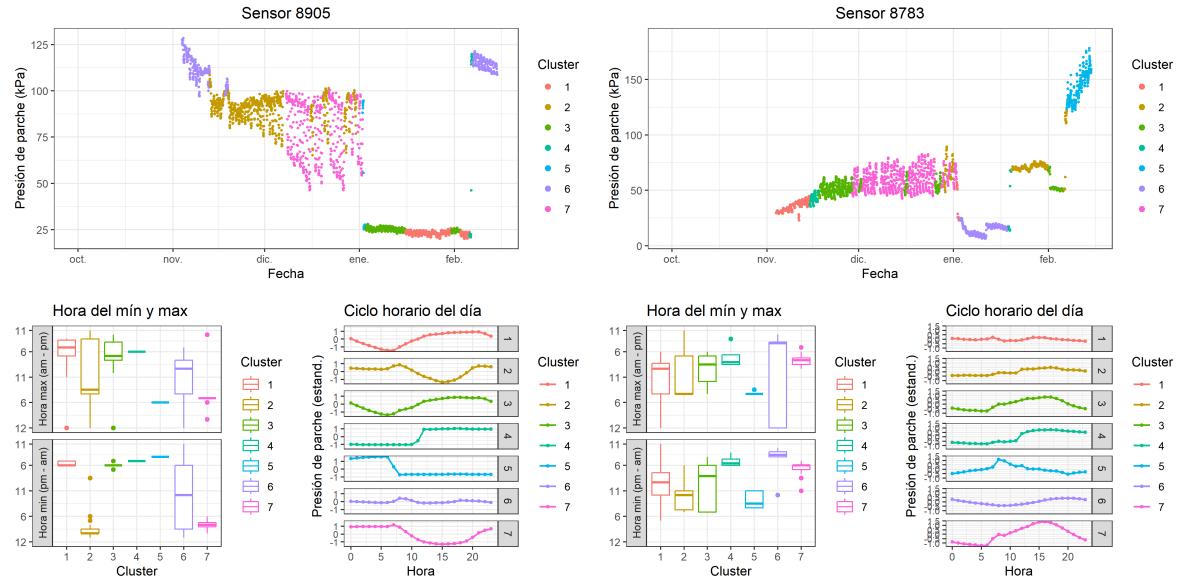




Unidad 3

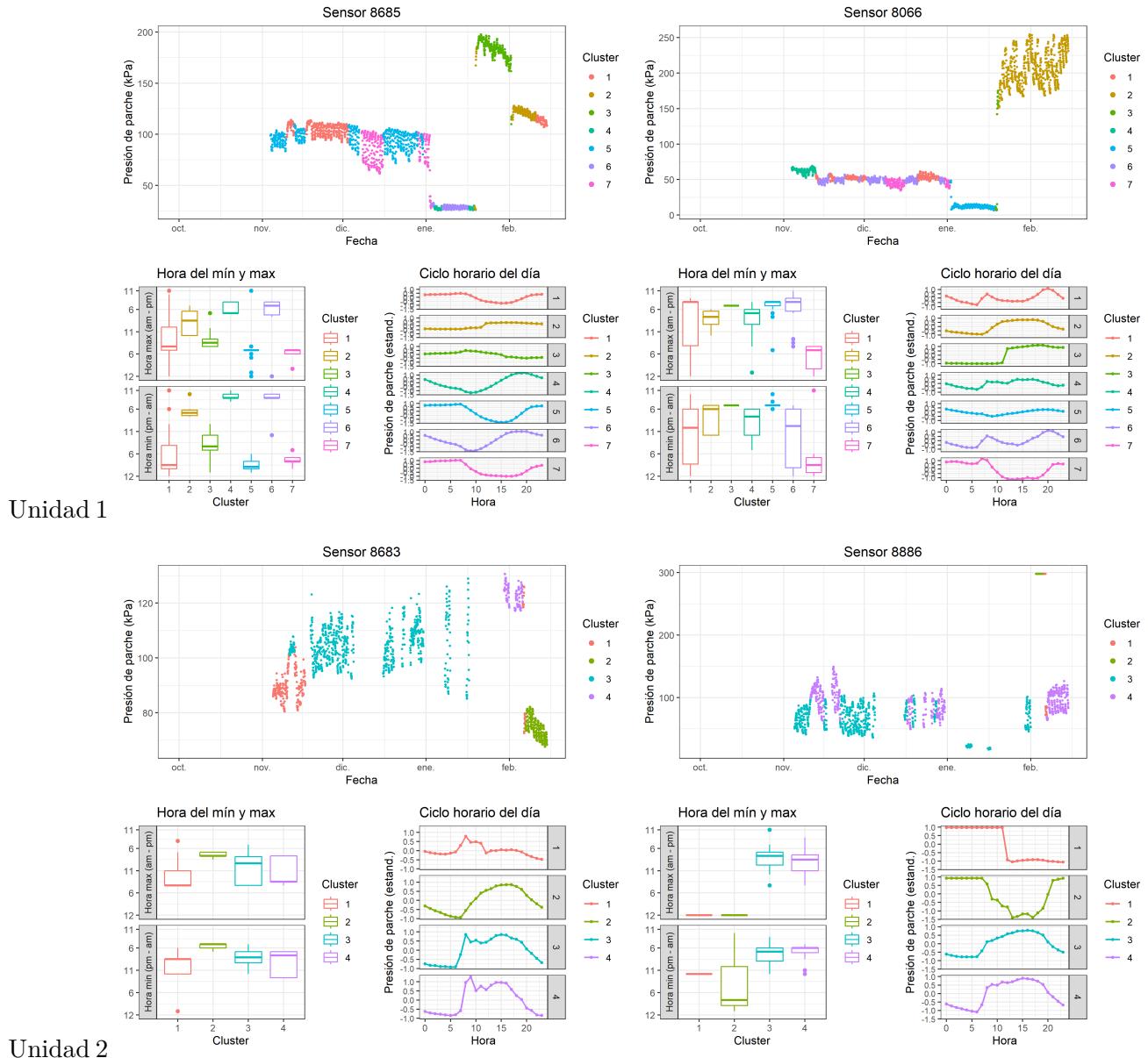
56 T3 (2023-2024)

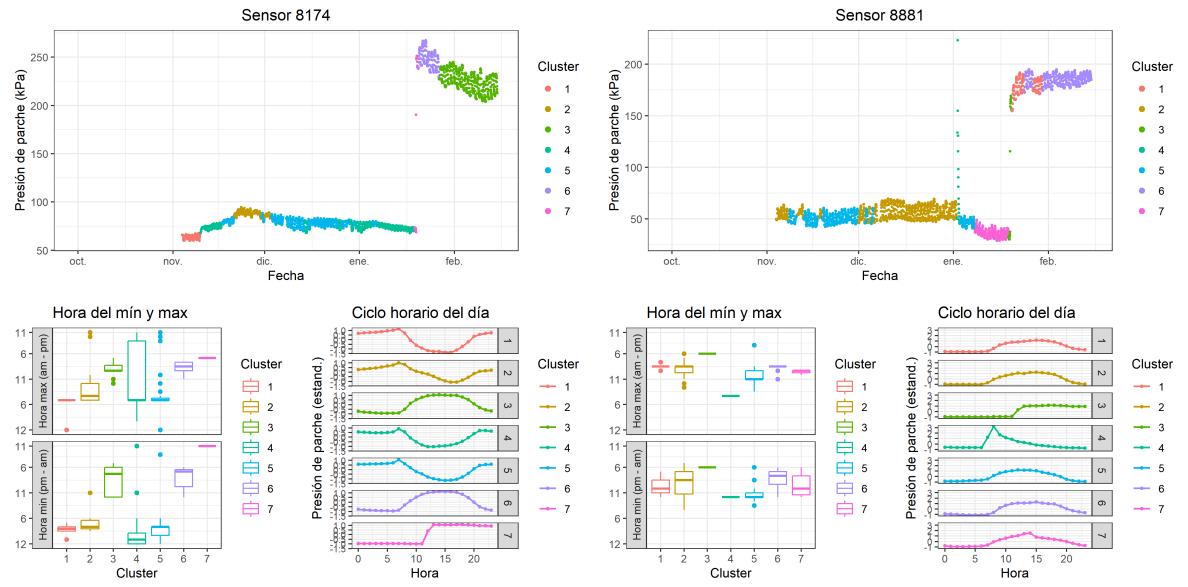




Unidad 3

57 T4 (2023-2024)





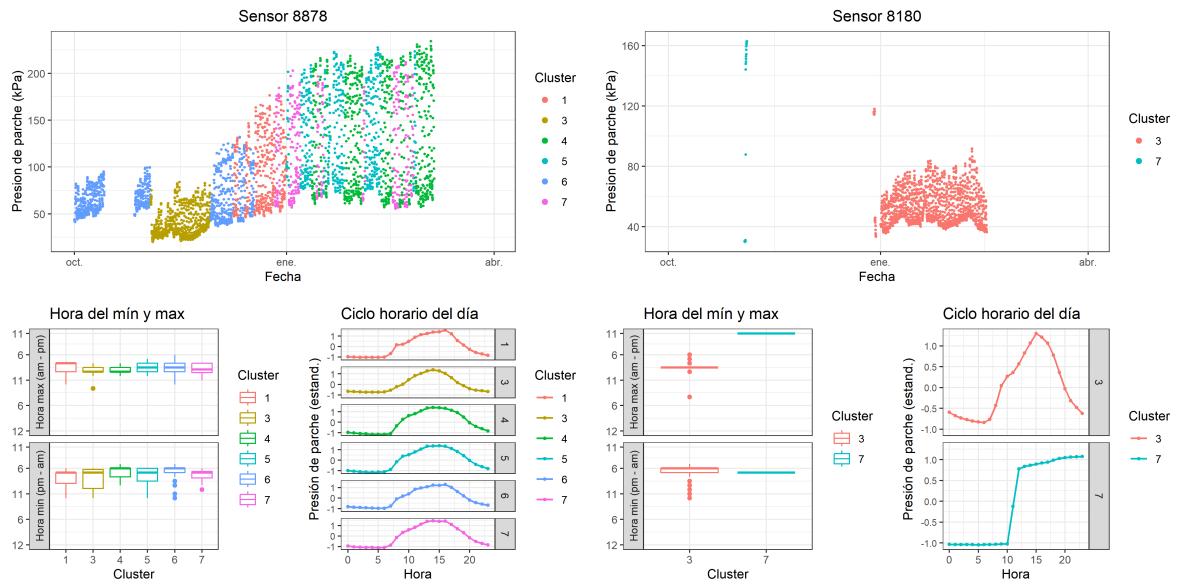
Unidad 3

58 Limpieza de datos: eliminación de clusters

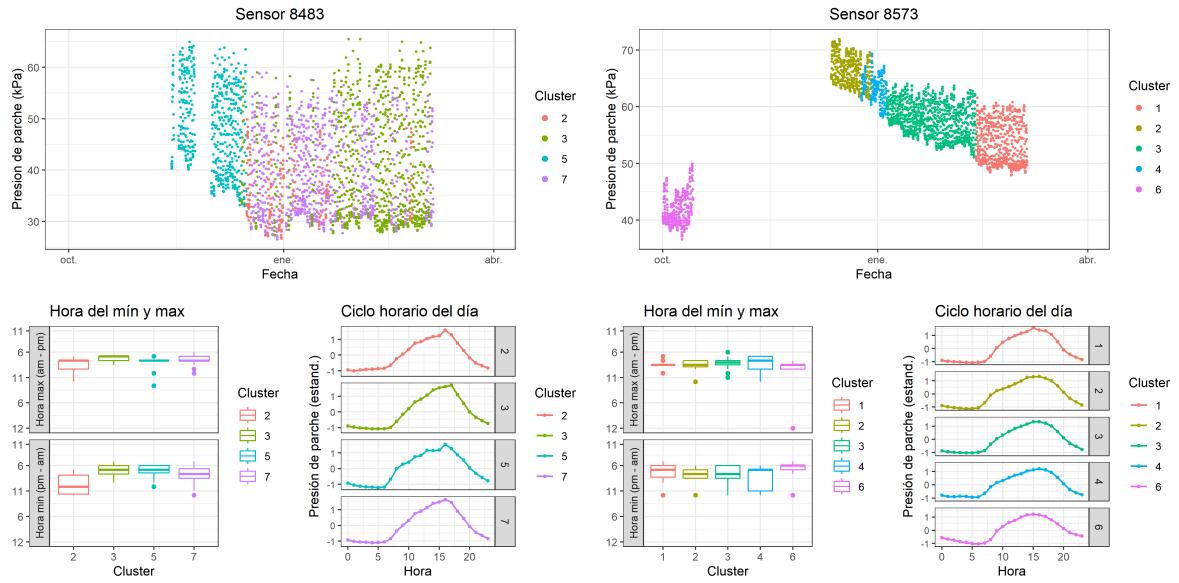
Para limpiar los datos de turgor, se emplearon series temporales de VPD y temperatura provenientes de las estaciones meteorológicas de los dos sitios de estudio. Se procedió a calcular el coeficiente de correlación entre cada cluster y los valores de VPD y temperatura respecto al tiempo (escala horaria) 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.

58.1 La Esperanza

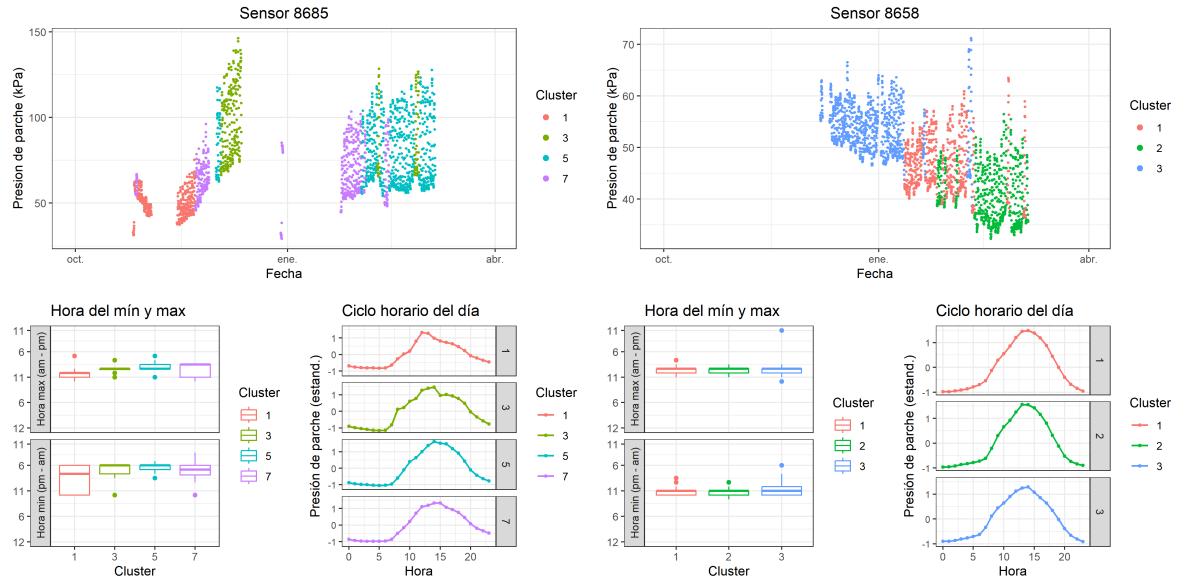
59 T1 (2022-2023)



Unidad 1

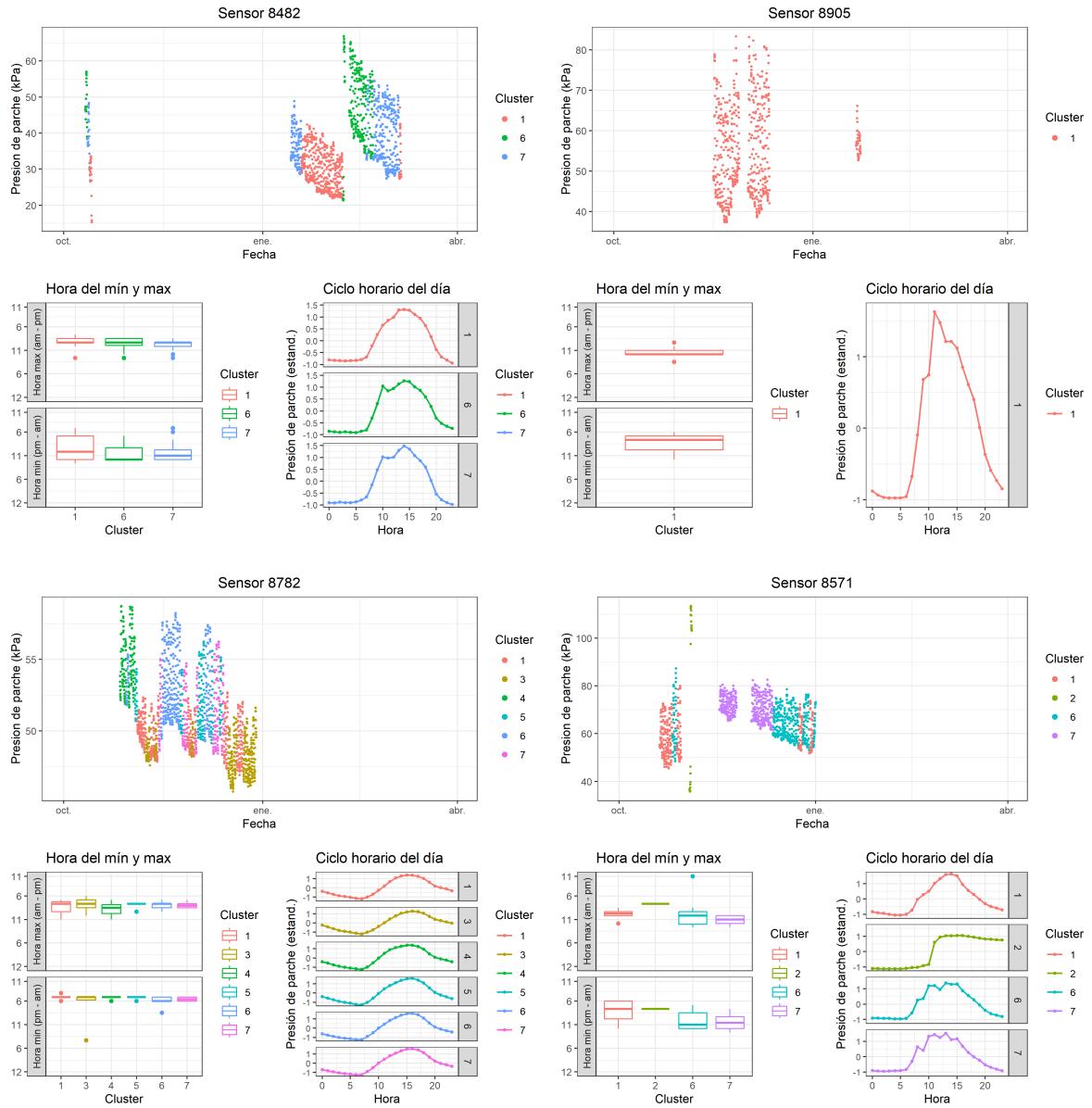


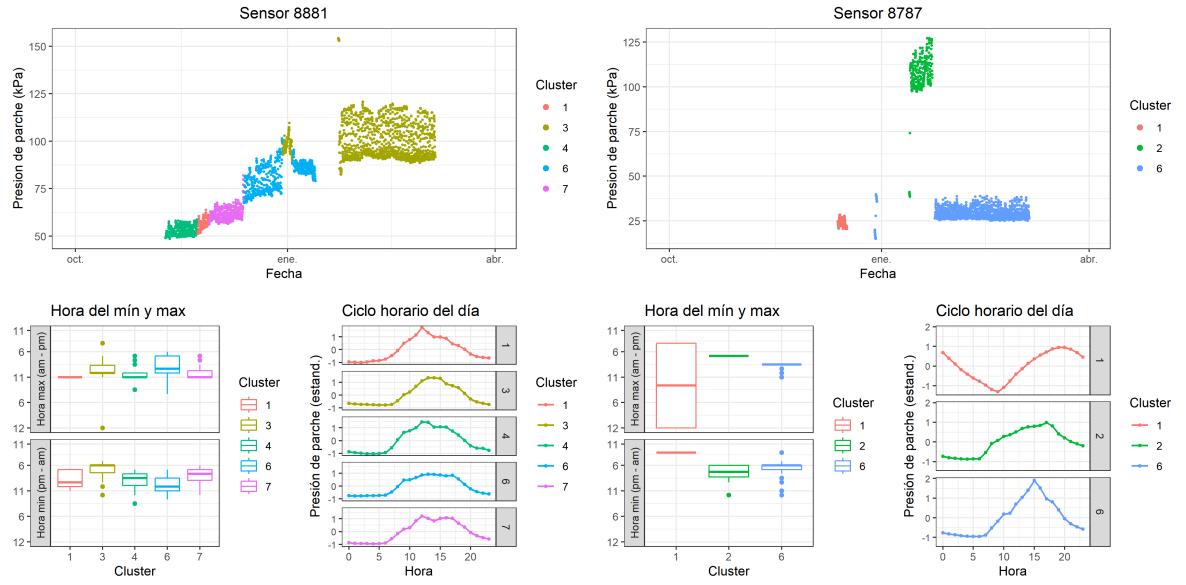
Unidad 2



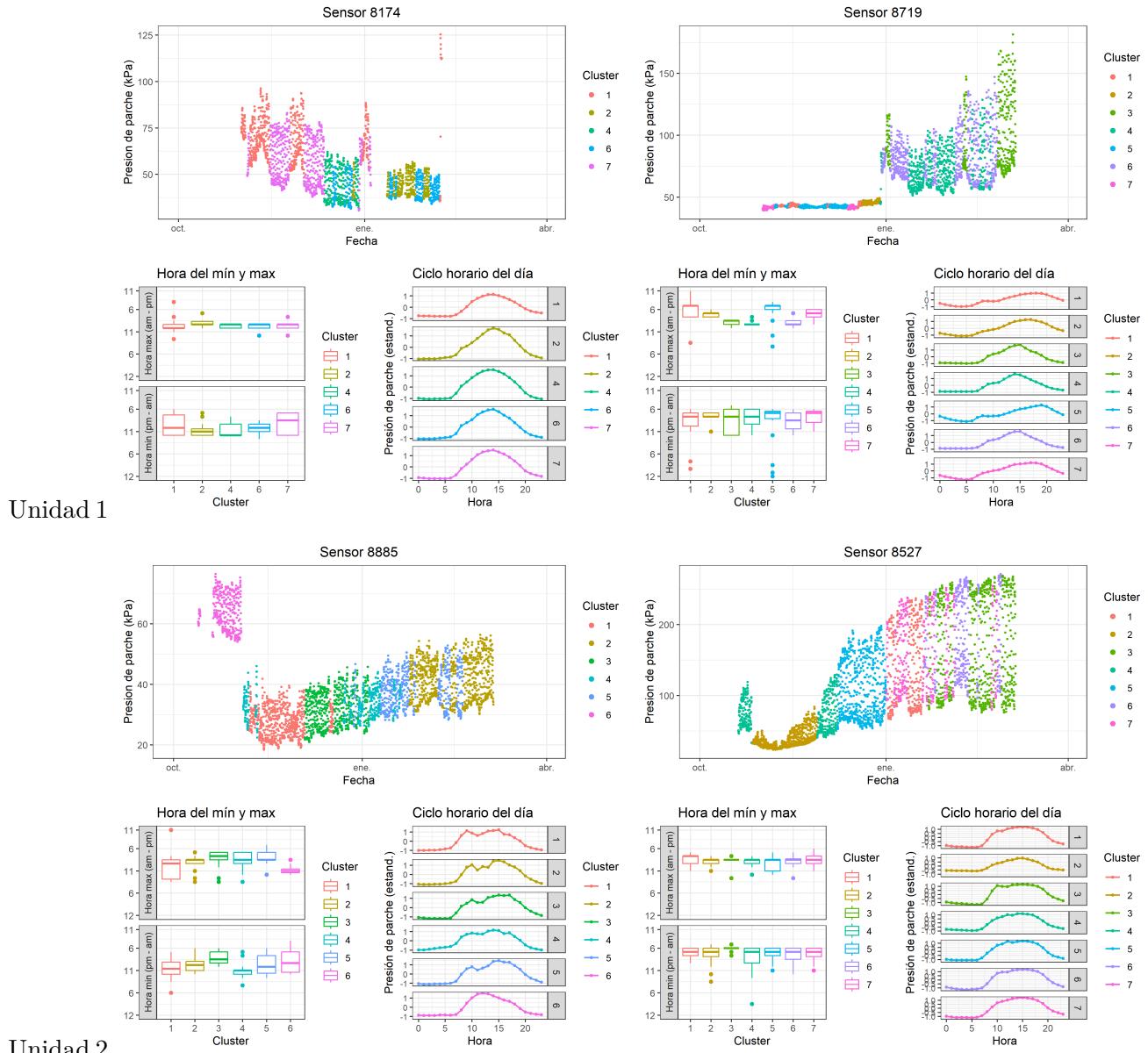
Unidad 3

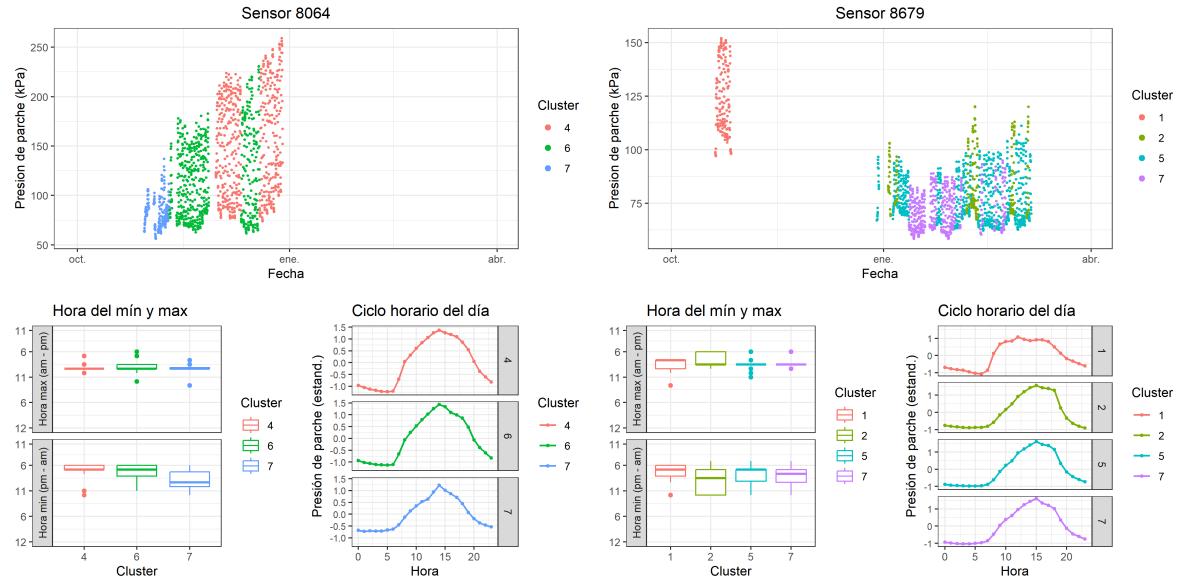
60 T2 (2022-2023)





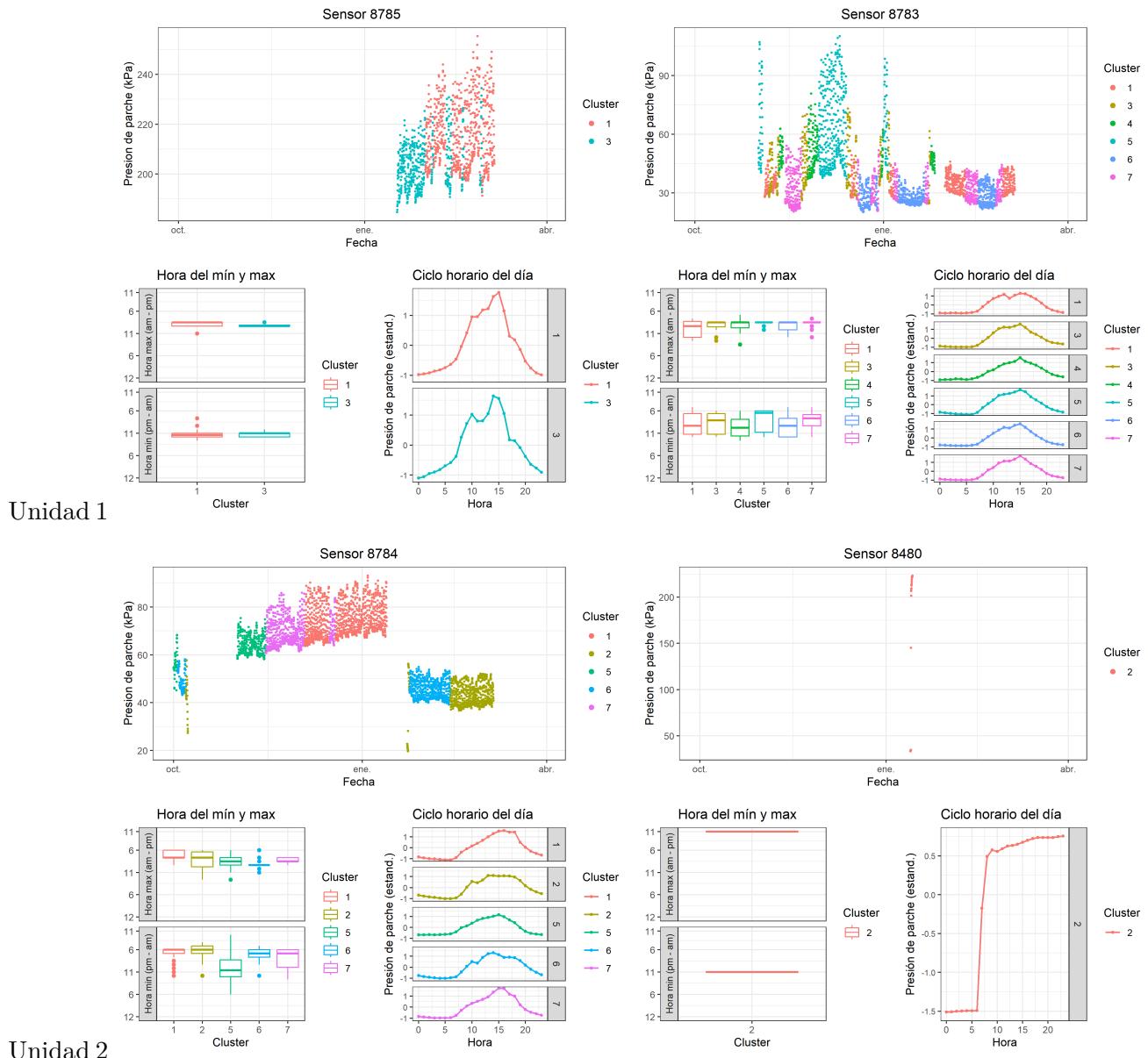
61 T3 (2022-2023)

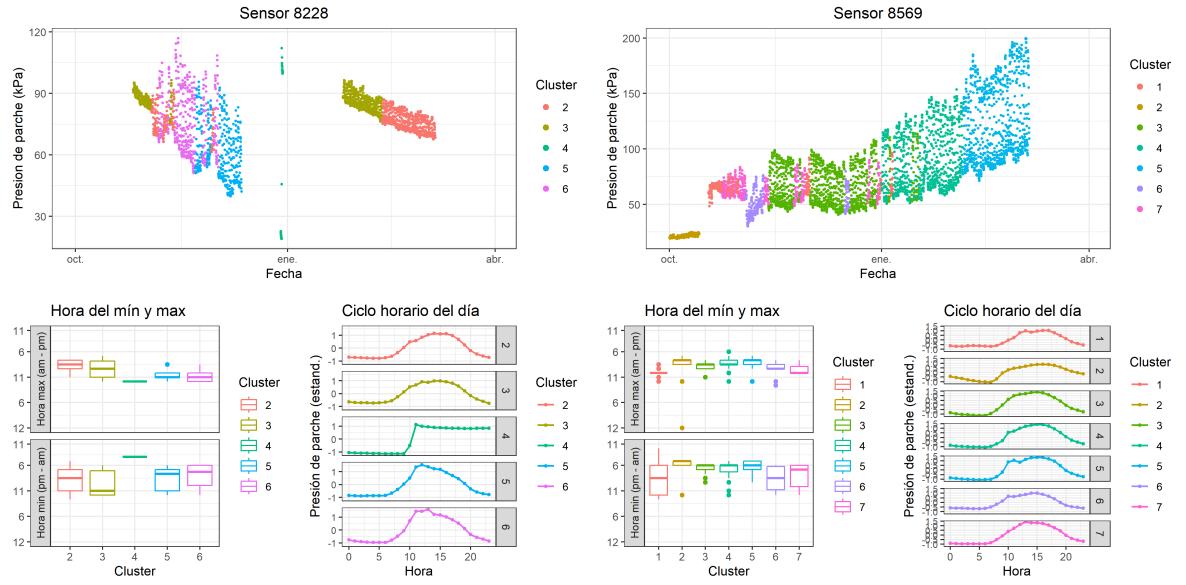




Unidad 3

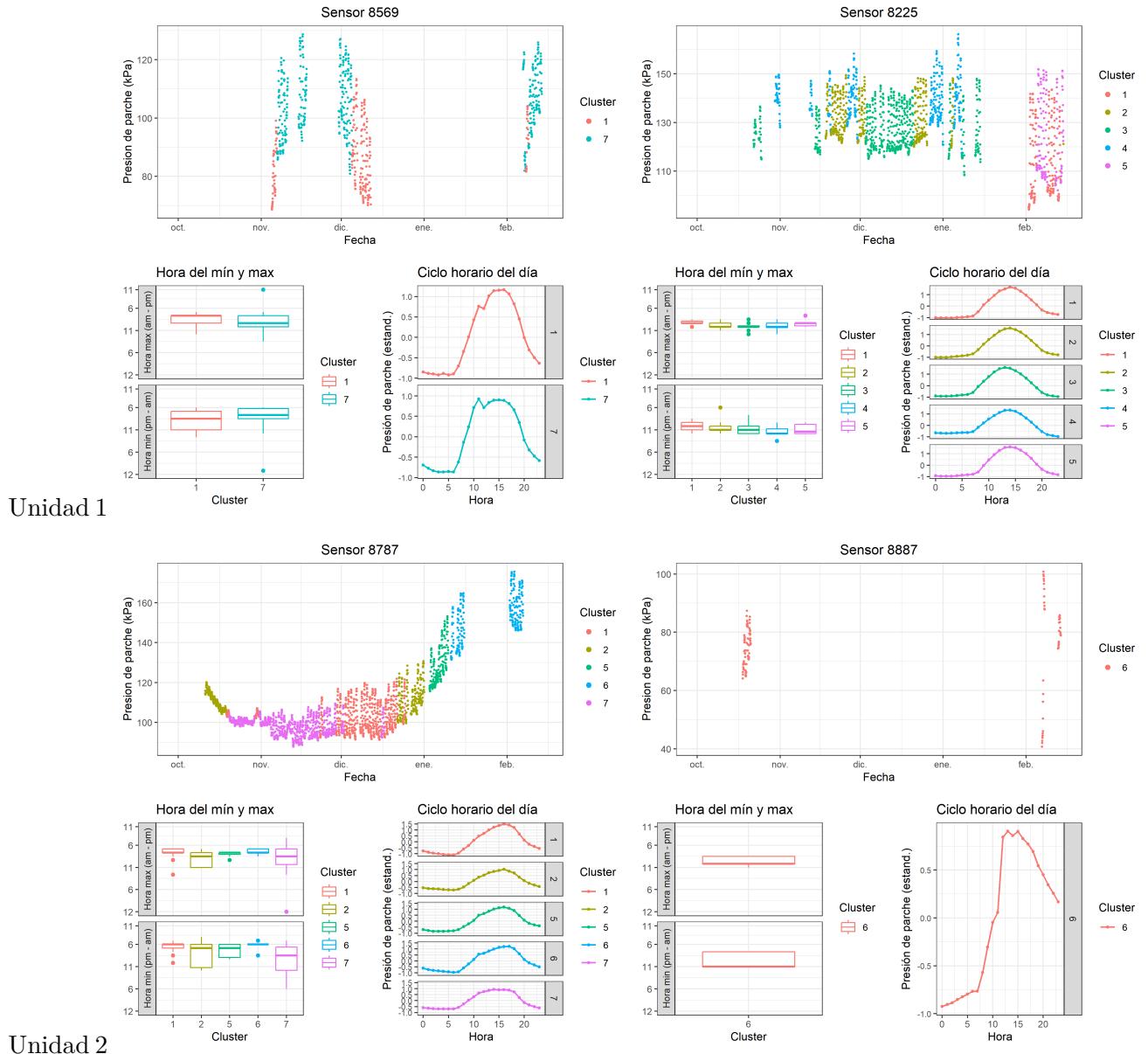
62 T4 (2022-2023)

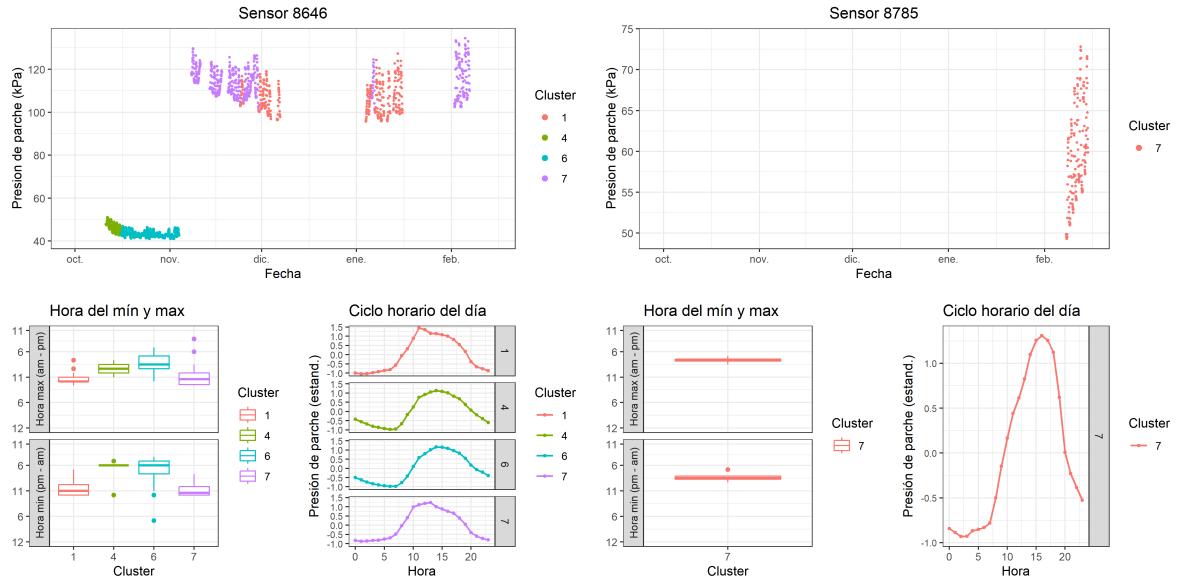




Unidad 3

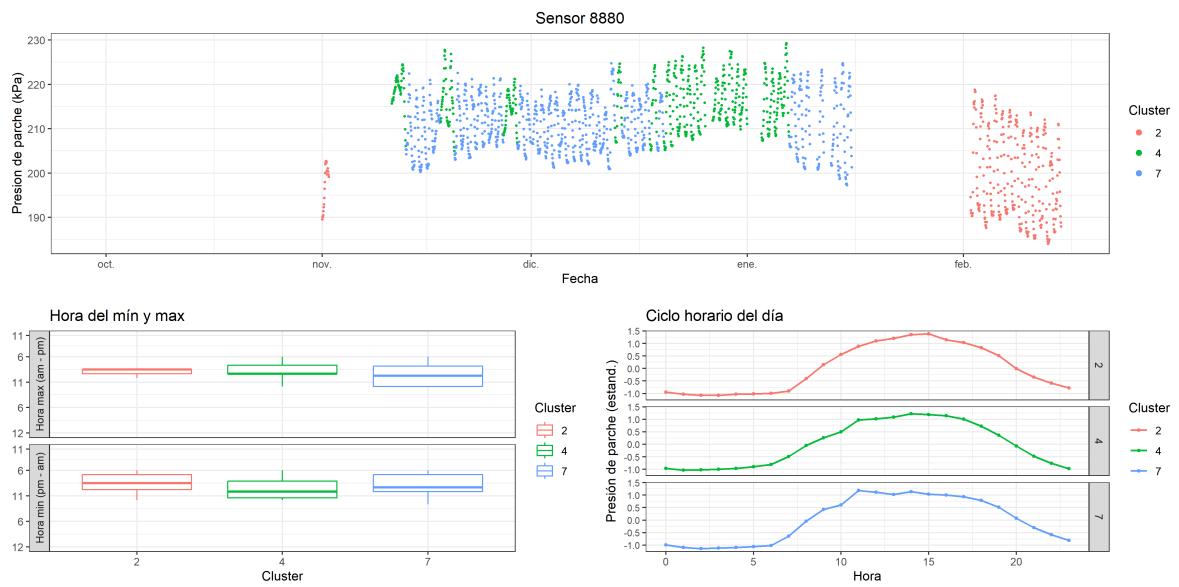
63 T1 (2023-2024)



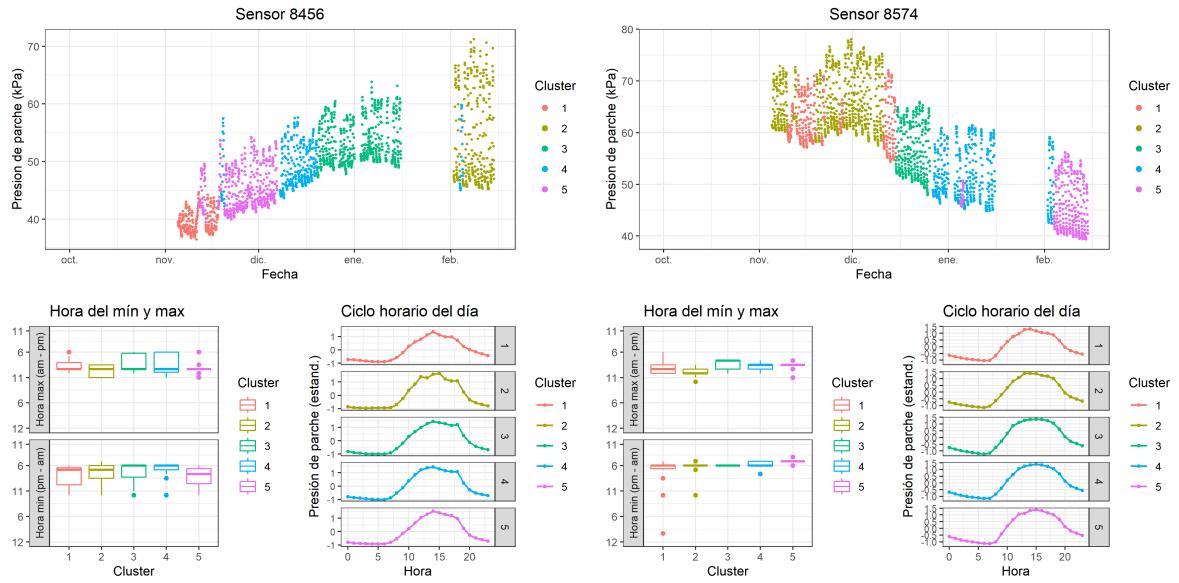


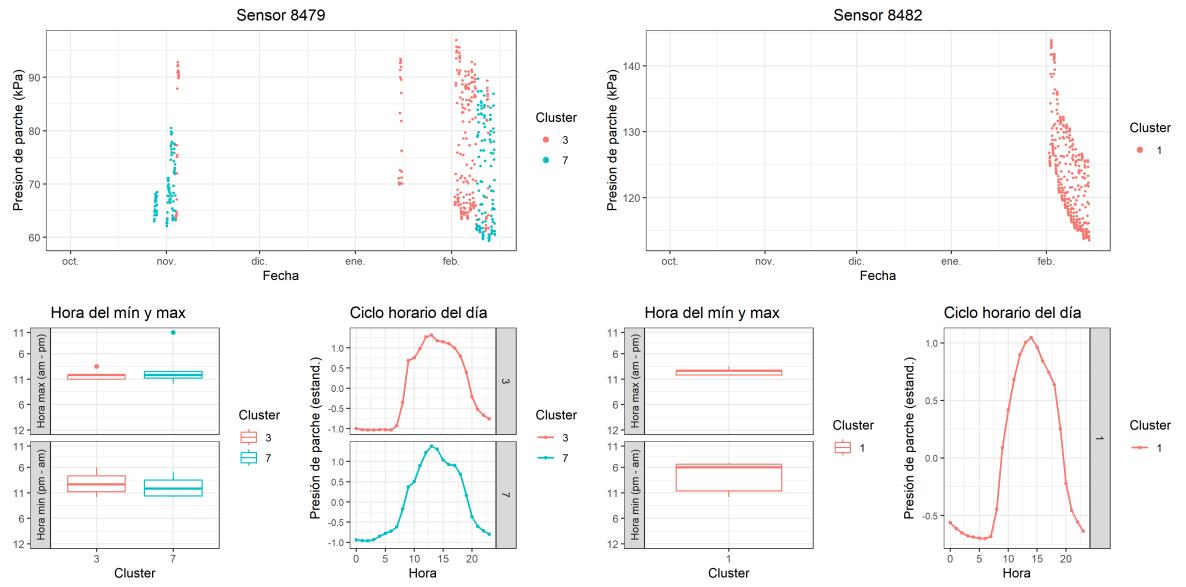
Unidad 3

64 T2 (2023-2024)



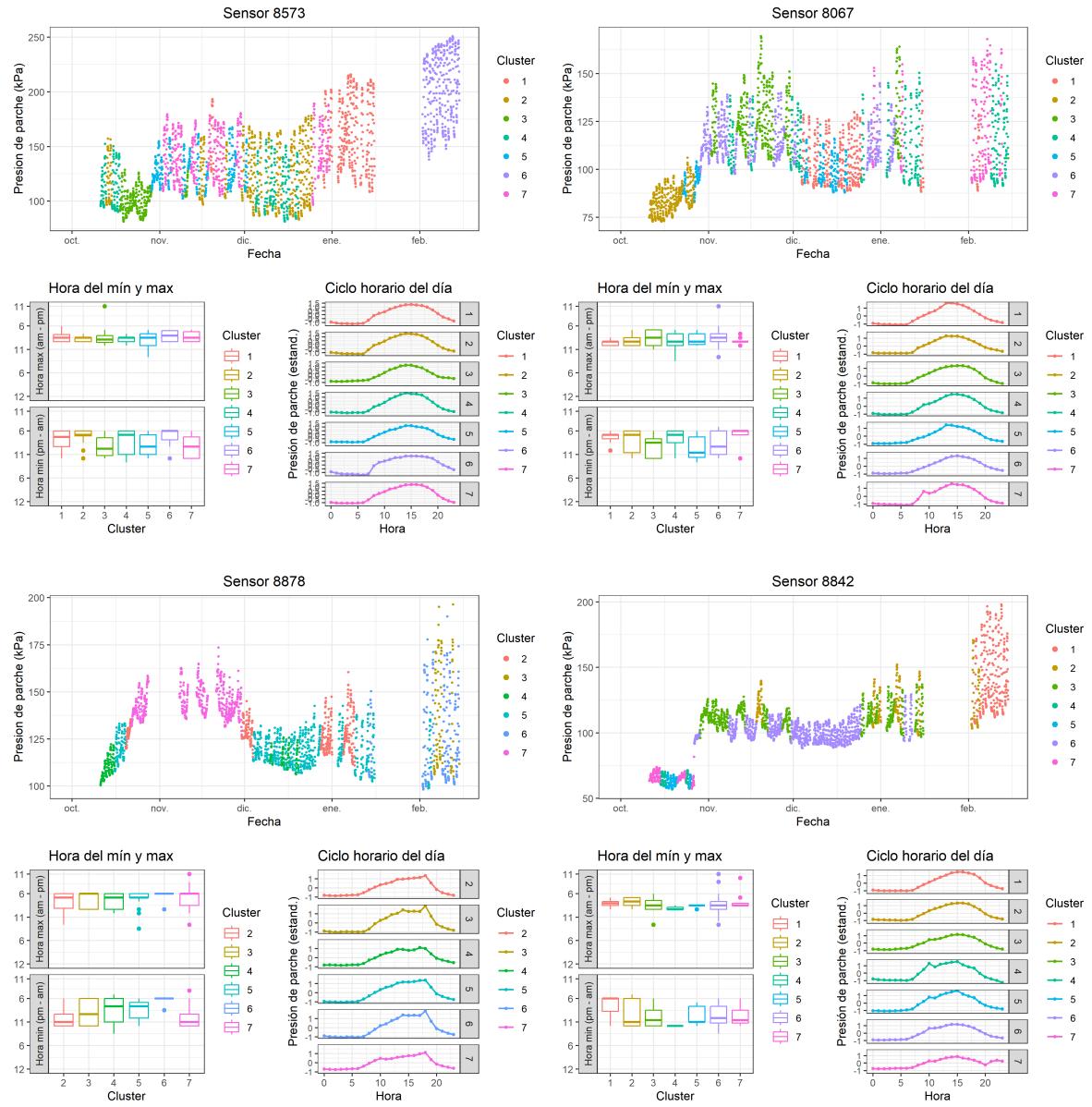
Unidad 1

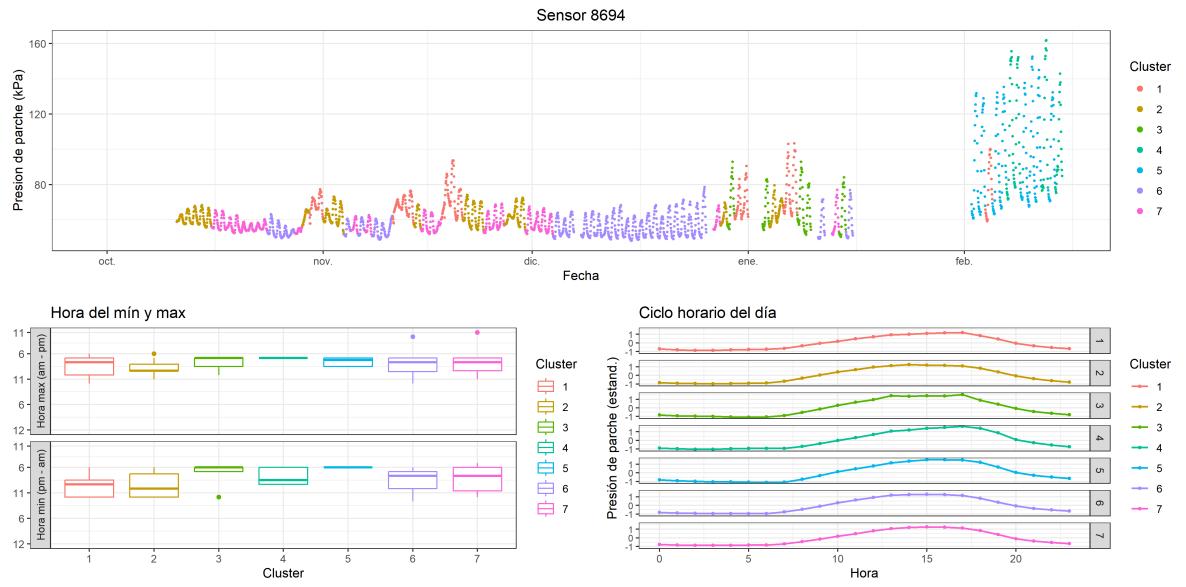




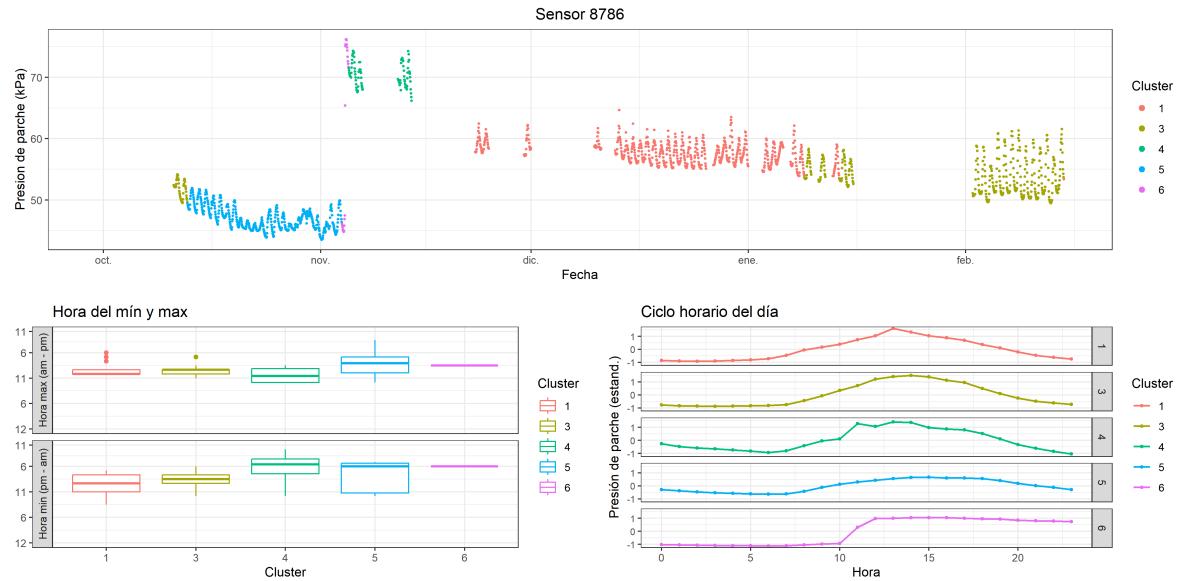
Unidad 3

65 T3 (2023-2024)

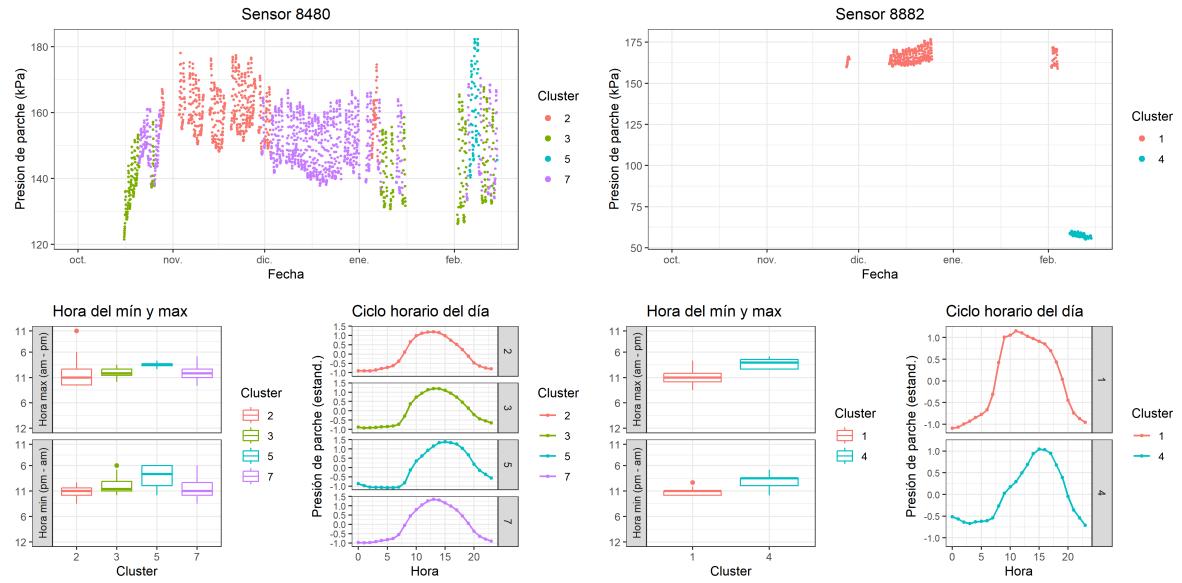




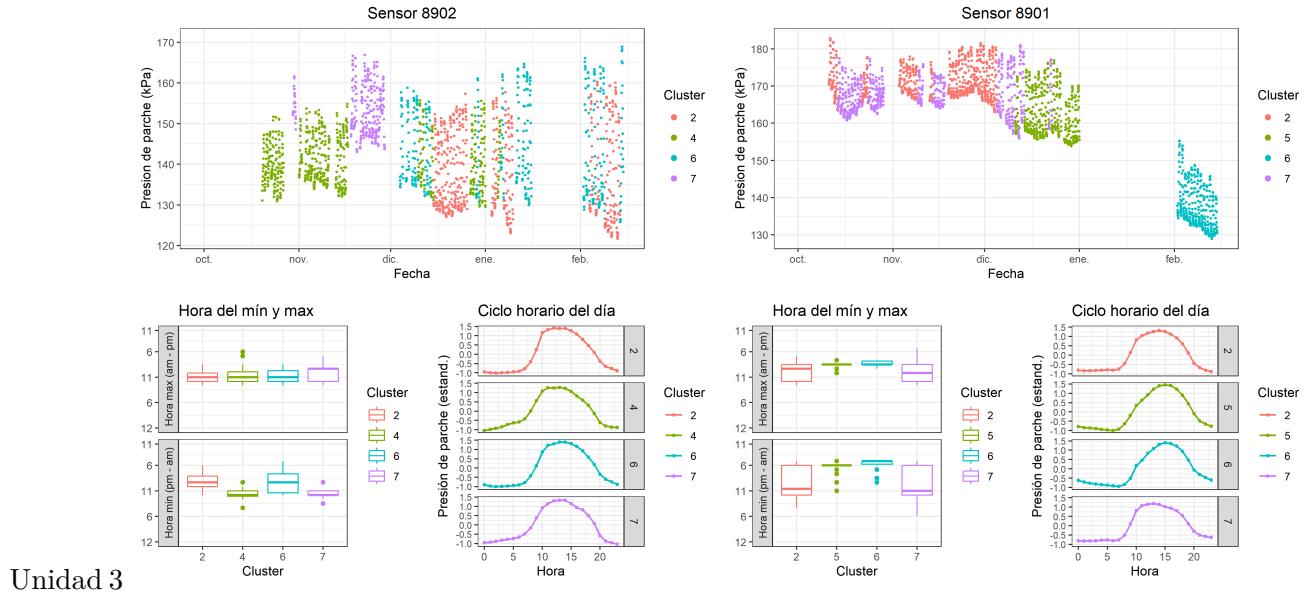
66 T4 (2023-2024)



Unidad 1



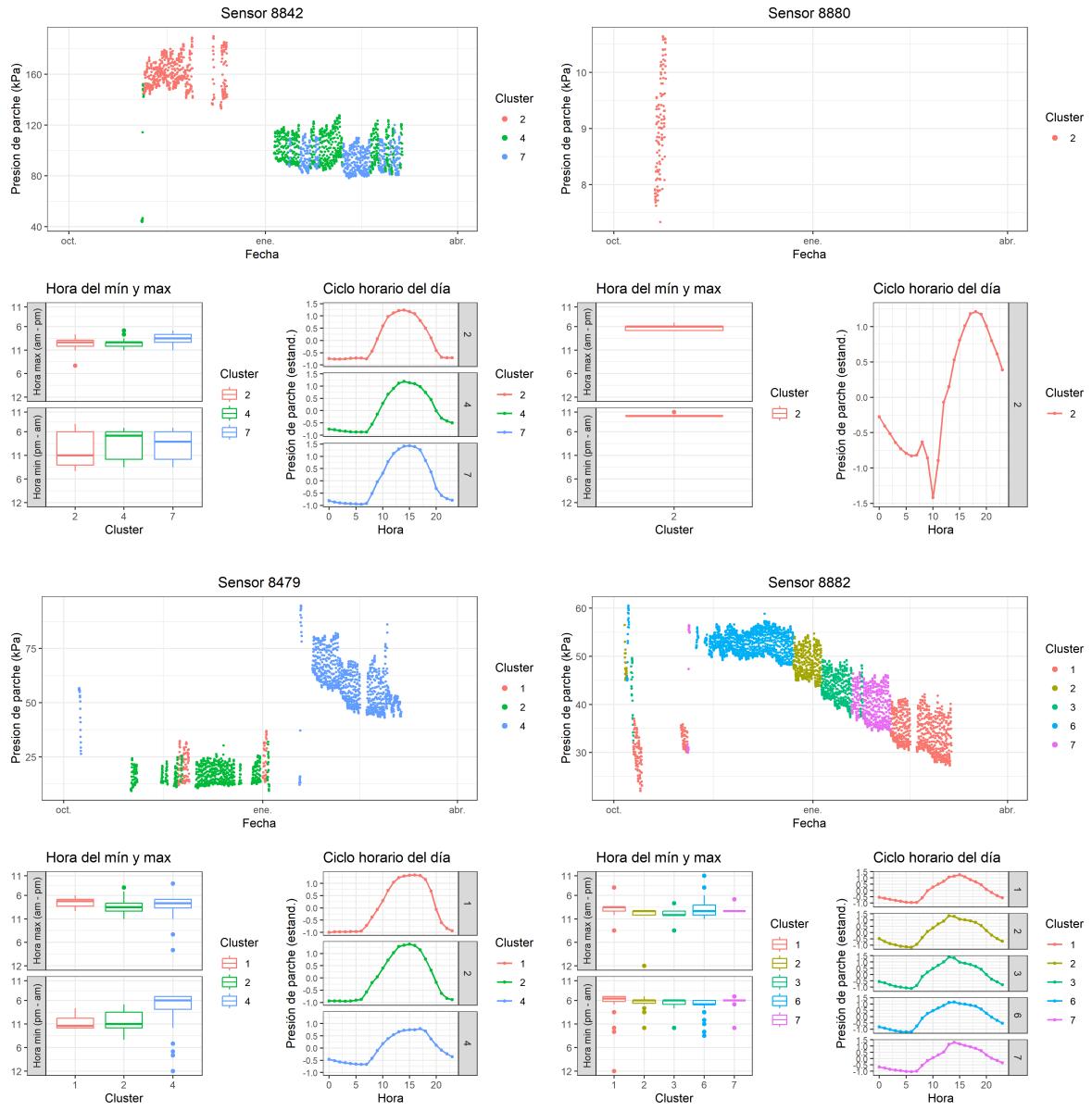
Unidad 2

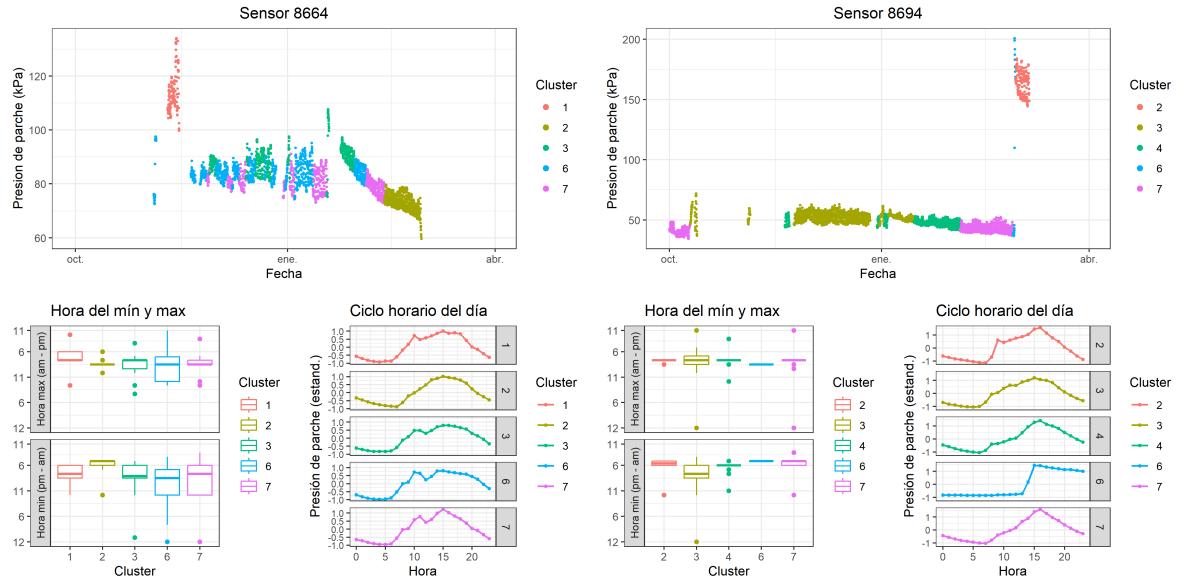


Unidad 3

66.1 Rio Claro

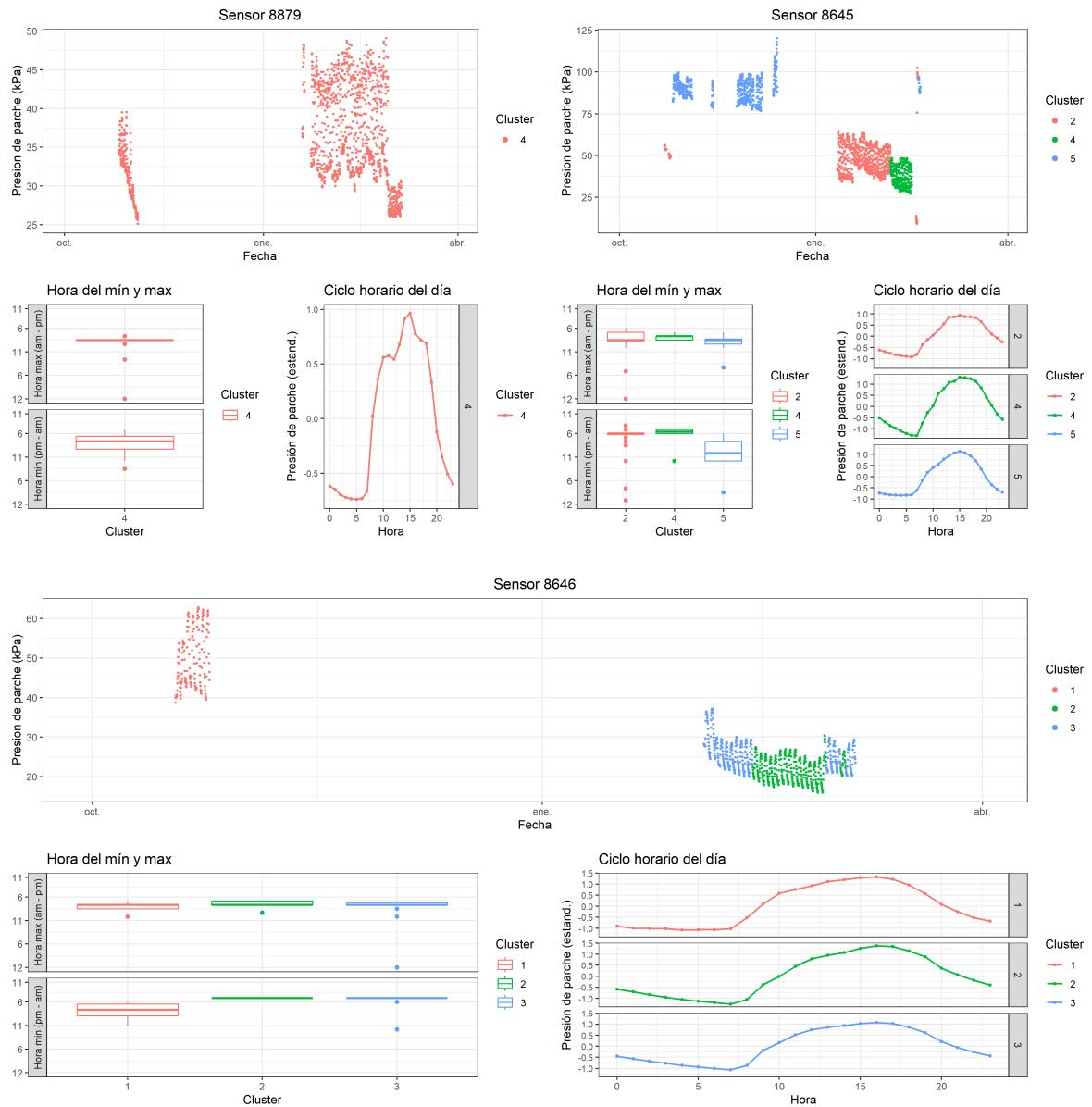
67 T1 (2022-2023)

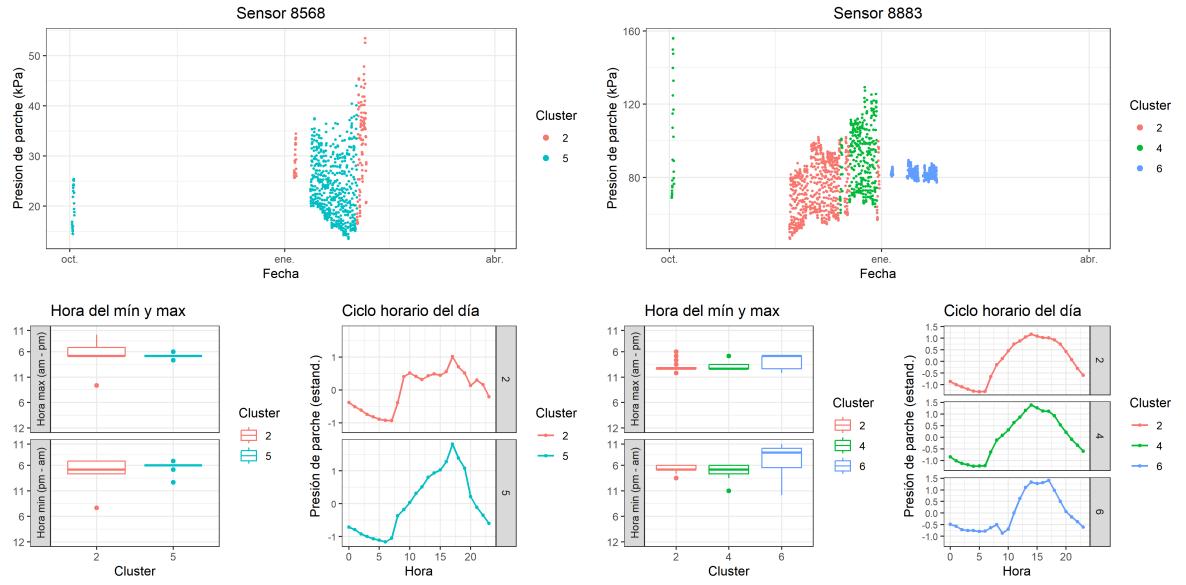




Unidad 3

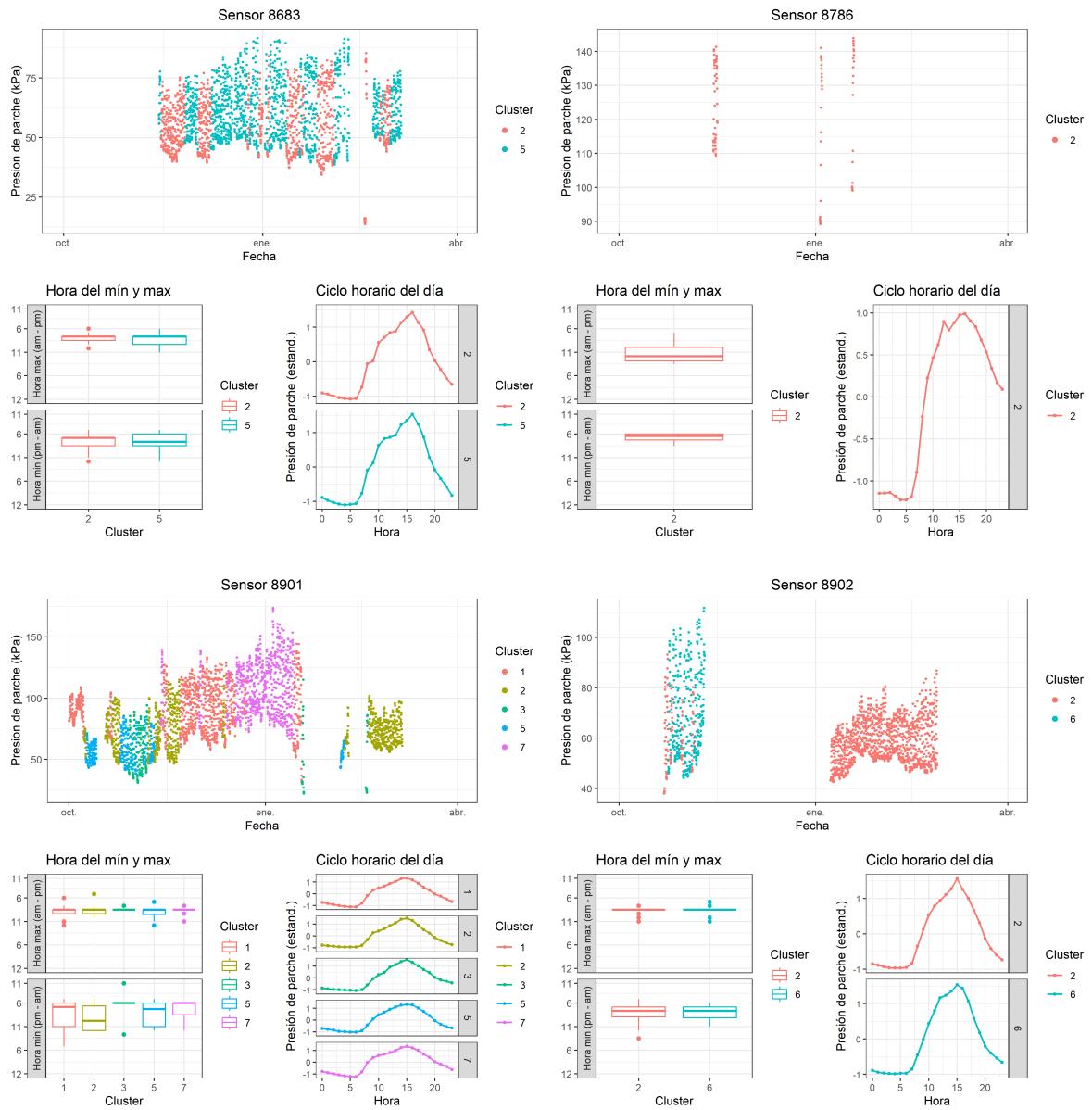
68 T2 (2022-2023)

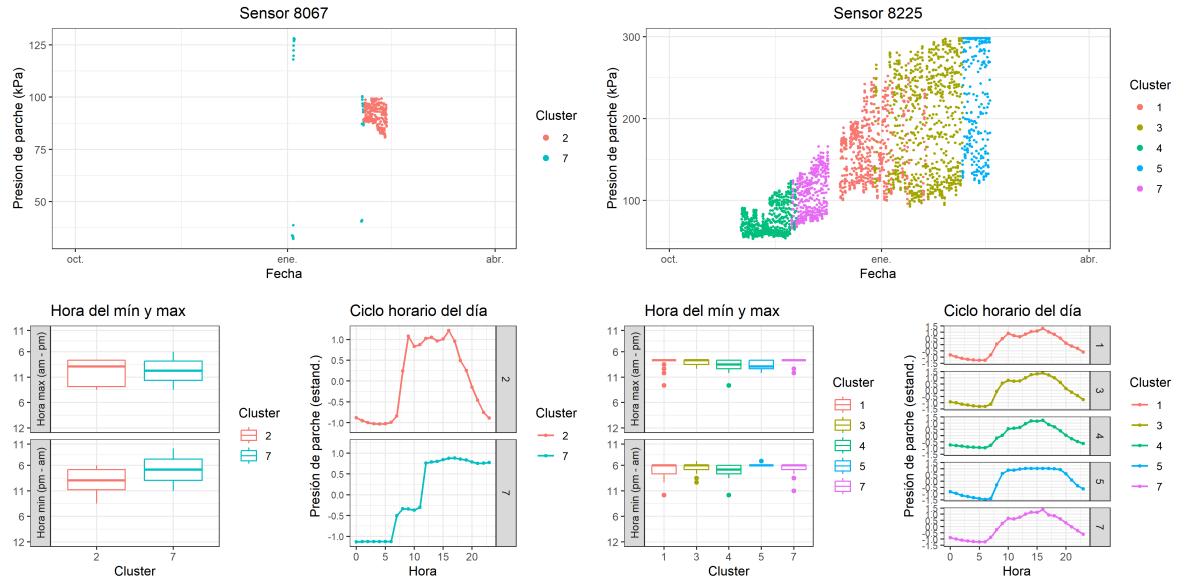




Unidad 3

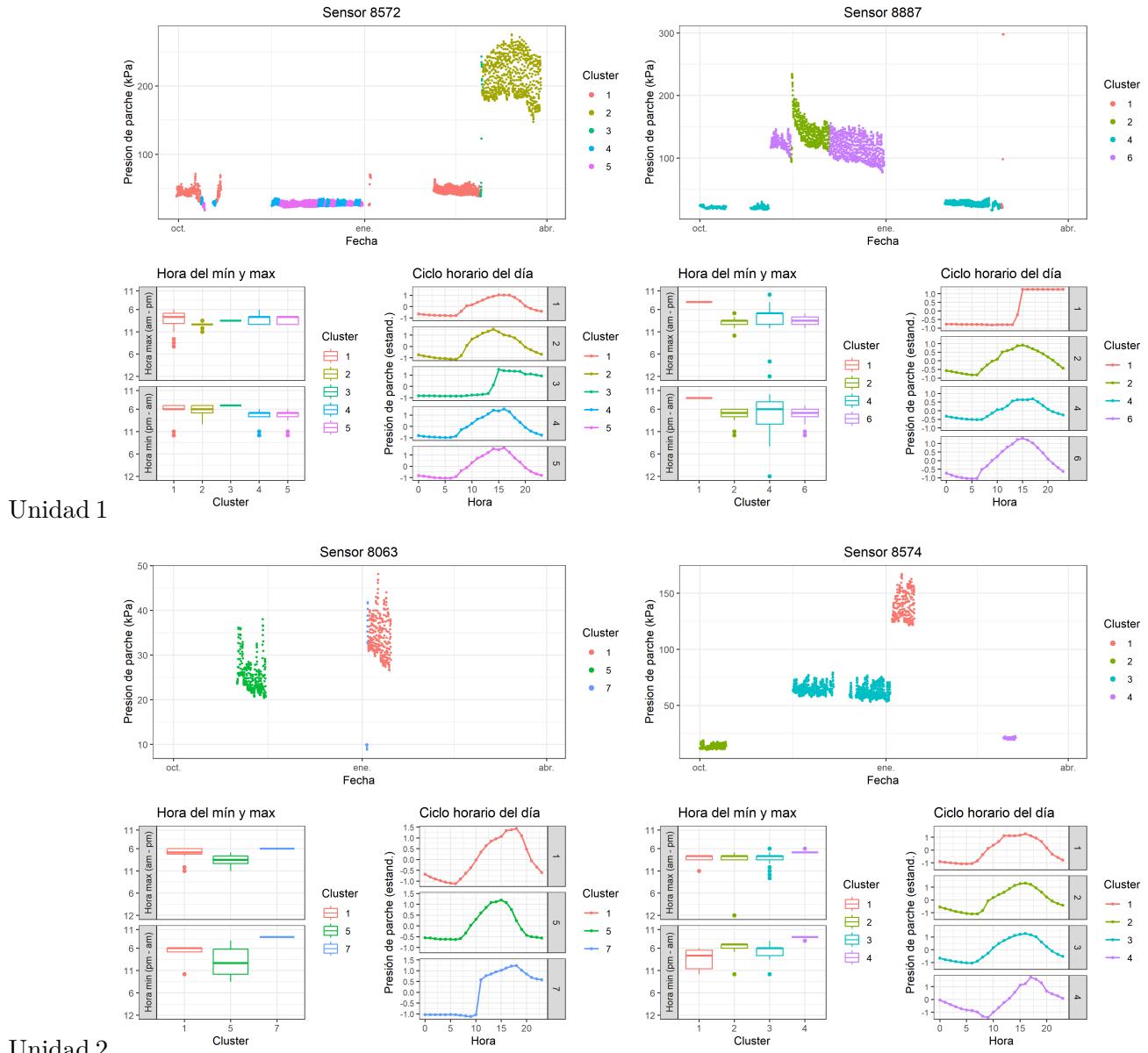
69 T3 (2022-2023)

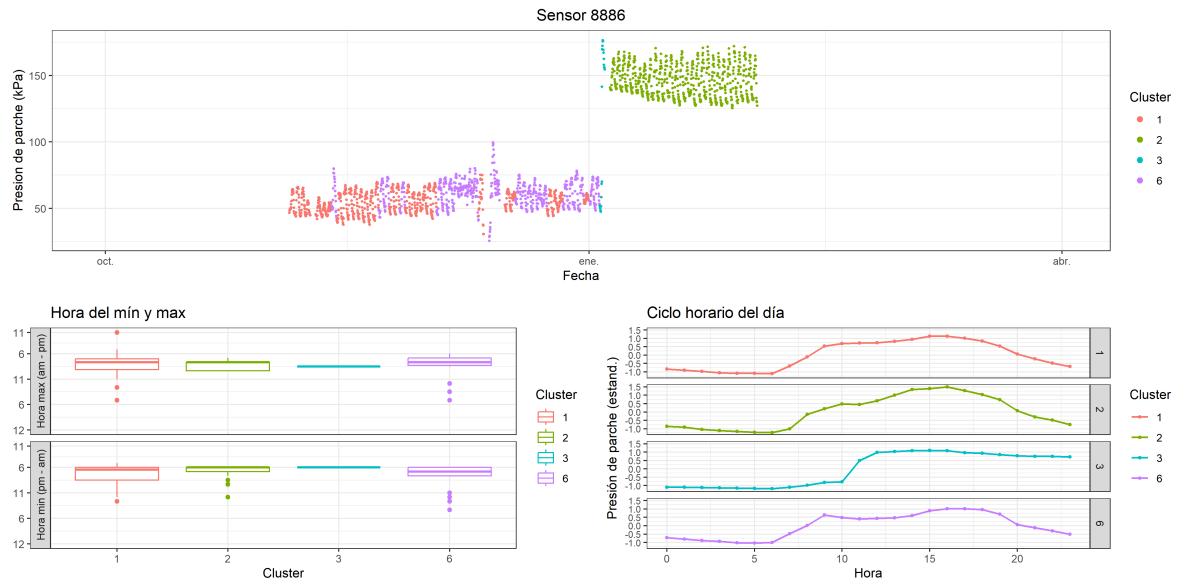




Unidad 3

70 T4 (2022-2023)





Unidad 3