



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

[Informe Técnico Final Proyecto ANII-FMV 176345]

**Desarrollo de un pronóstico específico
de ayuda a la navegación para los
usuarios del Canal Martín García y
Puerto de Nueva Palmira**

ABRIL 2026

Índice

1. Introducción	3
2. Zona de estudio	5
2.1. Hidrodinámica en el canal	5
3. Modelo hidrodinámico	6
3.1. Dominio y malla de cálculo	7
3.2. Forzantes del modelo	8
3.2.1. Caudales fluviales	8
3.2.2. Condición de borde oceánica	8
3.2.3. Forzante atmosférico	9
4. Configuración inicial	9
4.1. Reproducción de la dinámica	9
4.2. Análisis del sesgo	11
4.3. Discusión	11
4.4. Conclusión	11
5. Metodología de selección dinámica de ensambles	12
5.1. Metodología	12
5.2. Determinación de la ventana de evaluación	13
5.3. Limitaciones de la metodología	14
6. Evaluación de resultados	14
6.1. Variabilidad del ensamble seleccionado	14
6.2. Régimen medio	15
6.3. Régimen extremal	15
7. Alternativa con forzante atmosférico WRF local	16
7.1. Forzante WRF	16
7.2. Evaluación del desempeño con forzante WRF	17
8. Comparación de resultados	18
8.1. Configuraciones analizadas	18
8.2. Indicadores estadísticos de desempeño continuo	18
8.3. Análisis de la variabilidad diaria del error	19
8.4. Evaluación distribucional mediante gráficos Q-Q	21
8.5. Evaluación del régimen extremal	23
9. Conclusiones	25
10. Posibles mejoras	26
10.1. Incorporación de pronóstico de caudales del río Uruguay	26
10.2. Refinamiento de la malla y actualización batimétrica	27
10.3. Validación con información satelital	27
10.4. Mejoras en la representación de eventos extremos	27

10.5. Esquemas adaptativos de ensamble	27
11. Referencias	28
Anexos	29
A. Datos y estaciones utilizadas	29
B. Análisis de niveles observados	29
C. Estandarización de niveles	32
D. Relación entre caudal y nivel	33
E. Relación entre viento y nivel	35
F. Evaluación del sesgo del ensamble	36
F.1. Pilote Norden	36
F.2. Colonia	38
F.3. Conchillas	39
F.4. Nueva Palmira	40
G. Análisis de ventanas de evaluación	41
H. Comparación de ventanas intermedias	42
I. Evaluación de resultados	44
I.1. Selección del ensamble	44
I.2. Métricas de desempeño en régimen medio	45
I.3. Evaluación de eventos extremos	46
I.3.1. Metodología	46
I.3.2. Eventos extremos máximos	47
I.3.3. Eventos extremos mínimos	48
J. Evaluación detallada con forzante WRF	48
J.1. Variabilidad del ensamble elegido	48
J.2. Régimen medio	50
J.3. Régimen extremal	51
J.3.1. Metodología	51
J.3.2. Resultados	51
K. Tablas de contingencia: serie compuesta y ensamble 90	54

1. Introducción

Este informe constituye el Informe Final del Proyecto ANII-FMV 176345 “Desarrollo de un pronóstico específico de ayuda a la navegación para los usuarios del Canal Martín García y Puerto de Nueva Palmira”. El proyecto fue desarrollado entre abril 2024 y abril 2026 y el objetivo del proyecto fue desarrollar un pronóstico de condiciones meteoceánicas de corto plazo (días) para la zona del canal de navegación Martín García hasta Nueva Palmira en base al sistema PronUy_{RPFM}, con productos específicos definidos en conjunto por los usuarios del canal, que pueda ser difundido por las instituciones interesadas, que tenga una evaluación de calidad rigurosa y con la mejor información in-situ disponible, y que pueda replicarse metodológicamente a otras zonas del mar territorial uruguayo.

La estrategia metodológica para alcanzar el objetivo general incluye el análisis de datos, la implementación y calibración de un modelo hidrodinámico bidimensional para el área de estudio, y la inclusión del mismo en un nuevo producto del sistema de pronóstico marítimo PronUy desarrollado en Facultad de Ingeniería entre el IMFIA y el INCO (REF ribagua 2022). Además de los avances académicos presentados en este informe, se genera el producto operativo

El Canal Martín García y el Puerto de Nueva Palmira constituyen nodos estratégicos para la navegación y el transporte de cargas en la región del Río de la Plata. En este contexto, las decisiones operativas vinculadas al calado disponible, la planificación de rutas y la carga de los buques dependen fuertemente de la evolución del nivel del agua.

Actualmente, estas decisiones se basan en gran medida en atlas de marea astronómica, los cuales no consideran el efecto de la marea meteorológica. Este componente, asociado principalmente al viento y la presión atmosférica, puede generar variaciones significativas en el nivel del agua, particularmente durante eventos extremos. Como consecuencia, los usuarios tienden a adoptar criterios conservadores que pueden derivar en ineficiencias operativas y pérdidas económicas.

Con el objetivo de abordar esta limitación, el presente trabajo desarrolla un sistema de pronóstico de niveles que incorpora tanto la marea astronómica como la meteorológica, orientado a brindar soporte a la navegación en el Canal Martín García y el Puerto de Nueva Palmira. El sistema está dirigido a usuarios como prácticos, operadores portuarios y

empresas vinculadas al transporte fluvial, y busca mejorar la toma de decisiones mediante información más precisa y representativa de las condiciones reales.

Para ello, se implementa un modelo hidrodinámico forzado mediante un esquema de ensamble, complementado con una metodología de selección adaptativa que permite identificar, para cada instante, el miembro del ensamble que mejor representa la dinámica observada. A partir de esta estrategia, se genera un pronóstico de niveles con un horizonte de hasta 72 horas, específico para el Canal Martín García, que queda operativo en el enlace: <https://www.fing.edu.uy/imfia/pronostico-marea/martin-garcia/>.

El desempeño del sistema es evaluado frente al esquema actualmente operativo (Ensamble 90), con el objetivo de determinar si la metodología propuesta permite mejorar la calidad del pronóstico. En particular, se plantea la siguiente hipótesis: la implementación de una serie compuesta basada en selección dinámica de miembros de ensamble permite reducir los errores de pronóstico (RMSE y BIAS) sin degradar la capacidad de detección de eventos extremos, para horizontes de hasta 72 horas en el Canal Martín García y el Puerto de Nueva Palmira. Adicionalmente, se analiza el impacto del forzante atmosférico en el desempeño del sistema, comparando configuraciones basadas en productos globales y regionales.

En este informe se describe la metodología utilizada en todo el estudio y se presentan los principales resultados obtenidos; el mismo se estructura de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se describe la zona de estudio, en el Capítulo 3 se describen las principales características de la implementación del modelo hidrodinámico, en el Capítulo 4 se describen los resultados obtenidos en la configuración de partida, en el Capítulo 5 se describe la metodología de selección del pronóstico y en el Capítulo 6 se describen los resultados obtenidos. Posteriormente, en el Capítulo 7 se plantea la alternativa del pronóstico utilizando como forzante meteorológico un modelo local y en el Capítulo 8 se comparan los resultados obtenidos con las distintas implementaciones del pronóstico. Por último, en los Capítulos 9 y 10 se presentan las conclusiones del estudio y las posibles mejoras del sistema que pueden desarrollarse a futuro.

El estudio fue realizado por: Bach. Alejo Pilosio, Ing. Ianla Rivera, Ing. Diego Silva, Dr. Ing. Pablo Ezzatti y Dra. Ing. Mónica Fossati.

2. Zona de estudio

El Canal Martín García es una vía fluvial estratégica del Río de la Plata que conecta la desembocadura del río Uruguay con el sistema de navegación hacia el puerto de Buenos Aires [1]. Su relevancia radica en su utilización para el transporte de cargas a gran escala, en particular a través del Puerto de Nueva Palmira, uno de los principales nodos logísticos de la hidrovía Paraná–Paraguay [2].

2.1. Hidrodinámica en el canal

Con el objetivo de caracterizar la dinámica del nivel en la zona de estudio, se analizaron registros observados en distintas estaciones a lo largo del canal (ver ubicación en la Figura 1). La descripción de las estaciones, las fuentes de datos y su disponibilidad se presentan en el Anexo A, mientras que el análisis detallado de las series temporales se incluye en el Anexo B.

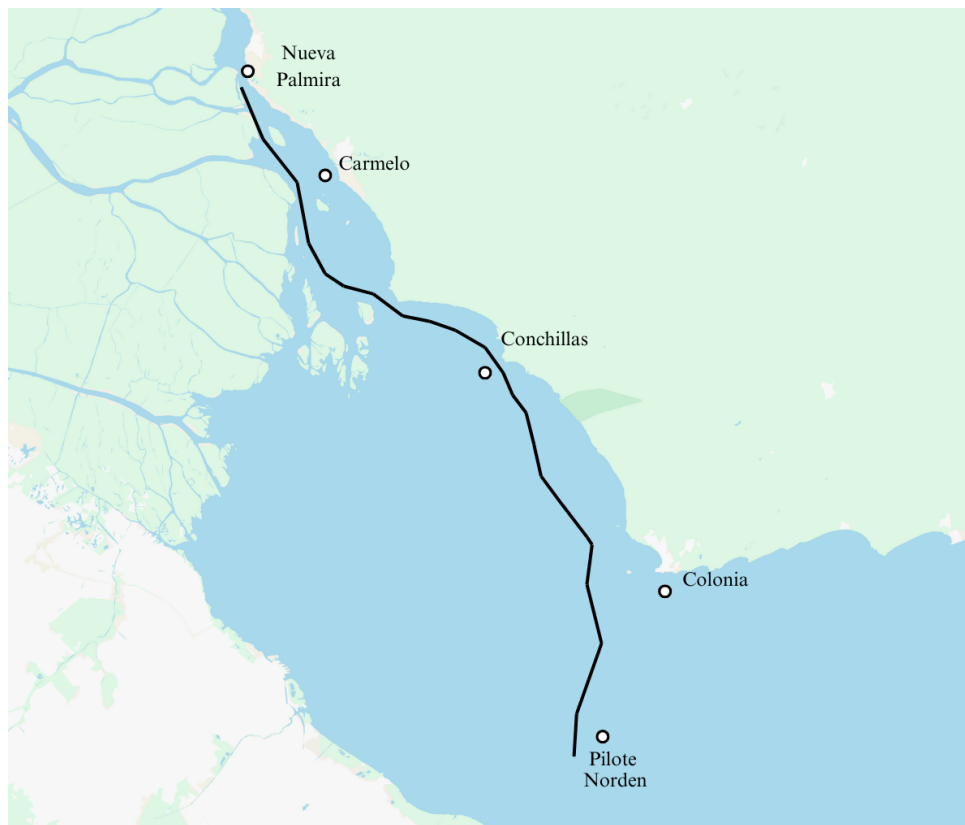


Figura 1: Ubicación de los mareógrafos de CARP (Carmelo, Conchillas, Colonia y Pilote Norden) y CARU (Nueva Palmira), en el Canal Martín García (trazado en negro).

En términos generales, las estaciones presentan un comportamiento altamente coherente, con oscilaciones sincronizadas a lo largo del canal. Sin embargo, se identifican diferencias sistemáticas en las estaciones de Carmelo y Nueva Palmira, donde las oscilaciones presentan menor amplitud en comparación con el resto. Este comportamiento sugiere un efecto amortiguador asociado a la influencia de los caudales fluviales.

Asimismo, se observa un desfase temporal progresivo en la señal de nivel a lo largo del canal, evidenciando un retardo en la propagación de la onda hacia las estaciones ubicadas más al norte. Este efecto es particularmente notorio en Carmelo y Nueva Palmira.

Para facilitar la comparación entre estaciones, se realizó una estandarización de los niveles observados, cuyos detalles metodológicos y resultados se presentan en el Anexo C.

El análisis conjunto con los caudales de los ríos Uruguay y Paraná indica que las variaciones en el caudal del río Uruguay tienen una influencia significativa sobre los niveles en la zona de Nueva Palmira y Carmelo, modulando tanto la amplitud como el nivel medio de la señal. En contraste, la influencia del río Paraná resulta menos relevante en esta región (ver Anexo D).

Por otra parte, el viento constituye un forzante clave en la variabilidad del nivel, especialmente durante eventos extremos, donde puede generar incrementos o descensos significativos respecto de la marea astronómica. Un análisis detallado de la relación entre viento y nivel se presenta en el Anexo E.

En conjunto, estos resultados evidencian que la dinámica del nivel en el canal está controlada por la interacción entre la propagación de la onda de marea, los aportes fluviales y el forzante meteorológico. Esto justifica la necesidad de utilizar un modelo hidrodinámico que integre estos procesos para la generación de pronósticos confiables.

3. Modelo hidrodinámico

El sistema de pronóstico se basa en el modelo hidrodinámico TELEMAC-MASCARET [3], el cual ya se encuentra implementado en un esquema operativo para el Río de la Plata [4]. Su utilización en este trabajo permite aprovechar una configuración previamente validada para la región, asegurando consistencia con los sistemas de pronóstico existentes.

En particular, se emplea el módulo TELEMAC2D, que resuelve las ecuaciones de Saint-

Venant en dos dimensiones horizontales mediante el método de elementos finitos [5]. Esta formulación resulta adecuada para la simulación de la dinámica en el Río de la Plata y el río Uruguay, donde los procesos dominantes están asociados a la propagación de la onda de marea, la interacción con los caudales fluviales y el forzante meteorológico.

Las simulaciones se ejecutan en la infraestructura de CLUSTERUY mediante procesamiento en paralelo, permitiendo la generación operativa de pronósticos con un horizonte de hasta 72 horas.

3.1. Dominio y malla de cálculo

El dominio del modelo abarca el río Uruguay, el Río de la Plata y su frente marítimo [6]. Los límites exteriores se extienden desde la ciudad de Mar del Plata (Argentina) hasta Río Grande (Brasil), mientras que aguas arriba el dominio se prolonga hasta la represa de Salto Grande (Figura 2).

Se emplea una malla bidimensional no estructurada con resolución variable, que oscila entre aproximadamente 3 km en el borde oceánico y 150 m en el tramo del río Uruguay. Esta resolución permite representar adecuadamente tanto la dinámica regional como los procesos locales en la zona del Canal Martín García.

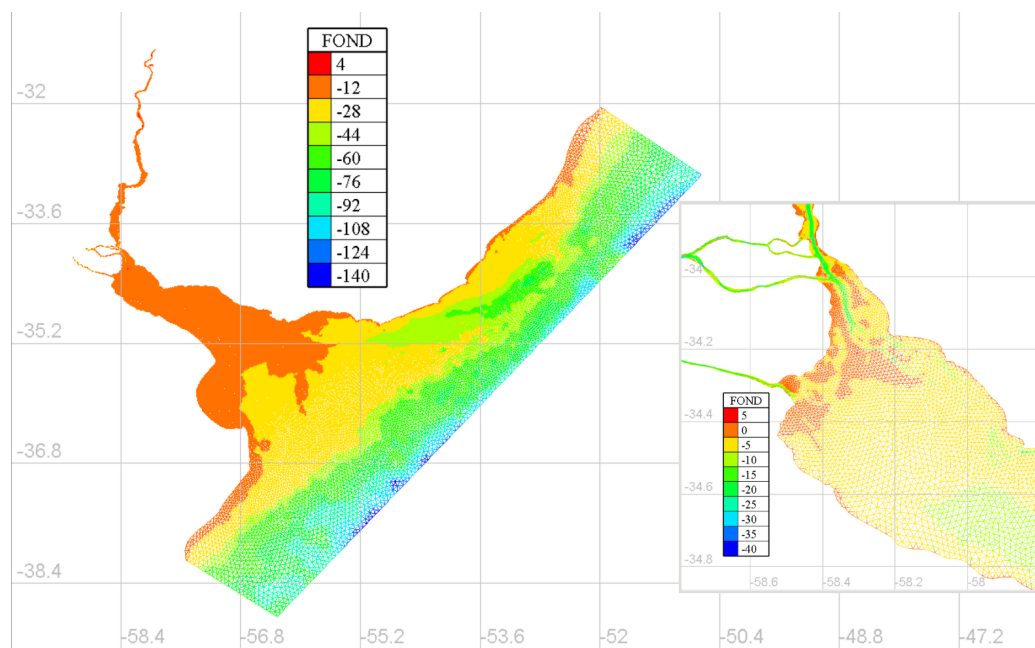


Figura 2: Malla de cálculo con batimetría incluida.

3.2. Forzantes del modelo

3.2.1. Caudales fluviales

El modelo incorpora los principales aportes fluviales al sistema, los cuales se representan mediante caudales constantes o variables según la disponibilidad de información.

Los caudales del río Uruguay (represa de Salto Grande), río Negro y río Paraná se introducen como condiciones variables en el tiempo, utilizando valores observados recientes. En estos casos, se adopta como condición de borde el promedio diario del día anterior, mantenido constante durante el horizonte de pronóstico.

Por otro lado, los ríos Daymán, Gualeguaychú y Santa Lucía se representan mediante caudales constantes, definidos a partir de valores medios históricos .

3.2.2. Condición de borde oceánica

En la frontera oceánica, el nivel del mar se construye a partir de la combinación de tres componentes: el nivel pronosticado por el modelo global RTOFS-HYCOM de NOAA-NCEP de $1/12^\circ$ de resolución disponible en tiempo real con frecuencia horaria [7], la marea astronómica proveniente del modelo FES2014 [8], y un nivel medio de referencia.

Sobre esta condición base se implementa un esquema de ensamble, cuyo objetivo es representar la incertidumbre asociada al nivel medio en la frontera oceánica. Este enfoque permite capturar la variabilidad inherente a las condiciones de borde y evaluar un rango de posibles escenarios de nivel, constituyendo una de las principales fuentes de error en la propagación hacia el interior del dominio [9].

Sobre esta condición base se implementa un esquema de ensamble, cuyo objetivo es representar la incertidumbre asociada al nivel medio en la frontera oceánica. Esta incertidumbre constituye una de las principales fuentes de error en la propagación del nivel hacia el interior del dominio.

Para ello, se generan 22 miembros de ensamble mediante la adición de perturbaciones constantes al nivel medio en el borde oceánico, en un rango comprendido entre 30 cm y 135 cm. Cada miembro del ensamble representa una posible condición del nivel medio, permitiendo explorar la sensibilidad del sistema a estas variaciones.

3.2.3. Forzante atmosférico

El forzante atmosférico se obtiene del modelo global GFS de NOAA-NCEP, utilizando los campos de viento a 10 m y presión atmosférica en superficie con resolución de $1/4^\circ$, disponible en tiempo real con frecuencia horaria.

Estos forzantes permiten representar la marea meteorológica, la cual constituye un componente clave en la variabilidad del nivel, especialmente durante eventos extremos, tal como se mostró en la sección anterior.

En este trabajo se emplea el miembro de control del sistema de ensamble atmosférico, priorizando consistencia y estabilidad en el forzante meteorológico.

4. Configuración inicial

En esta sección se evalúa el desempeño del sistema de ensamble en la simulación de niveles en las estaciones Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira. El análisis considera un conjunto de 22 miembros de ensamble, generados a partir de perturbaciones en la condición de borde oceánica, para el período comprendido entre octubre de 2024 y octubre de 2025.

La evaluación se enfoca en tres aspectos: (i) la capacidad de reproducir la dinámica temporal de los niveles, (ii) la representación de eventos extremos, y (iii) la variabilidad del sesgo entre los distintos miembros del ensamble.

4.1. Reproducción de la dinámica

En las estaciones Pilote Norden, Colonia y Conchillas, los distintos miembros del ensamble reproducen de forma consistente la dinámica observada, capturando adecuadamente la propagación de la onda y las variaciones de nivel a lo largo del tiempo (Figura 3).

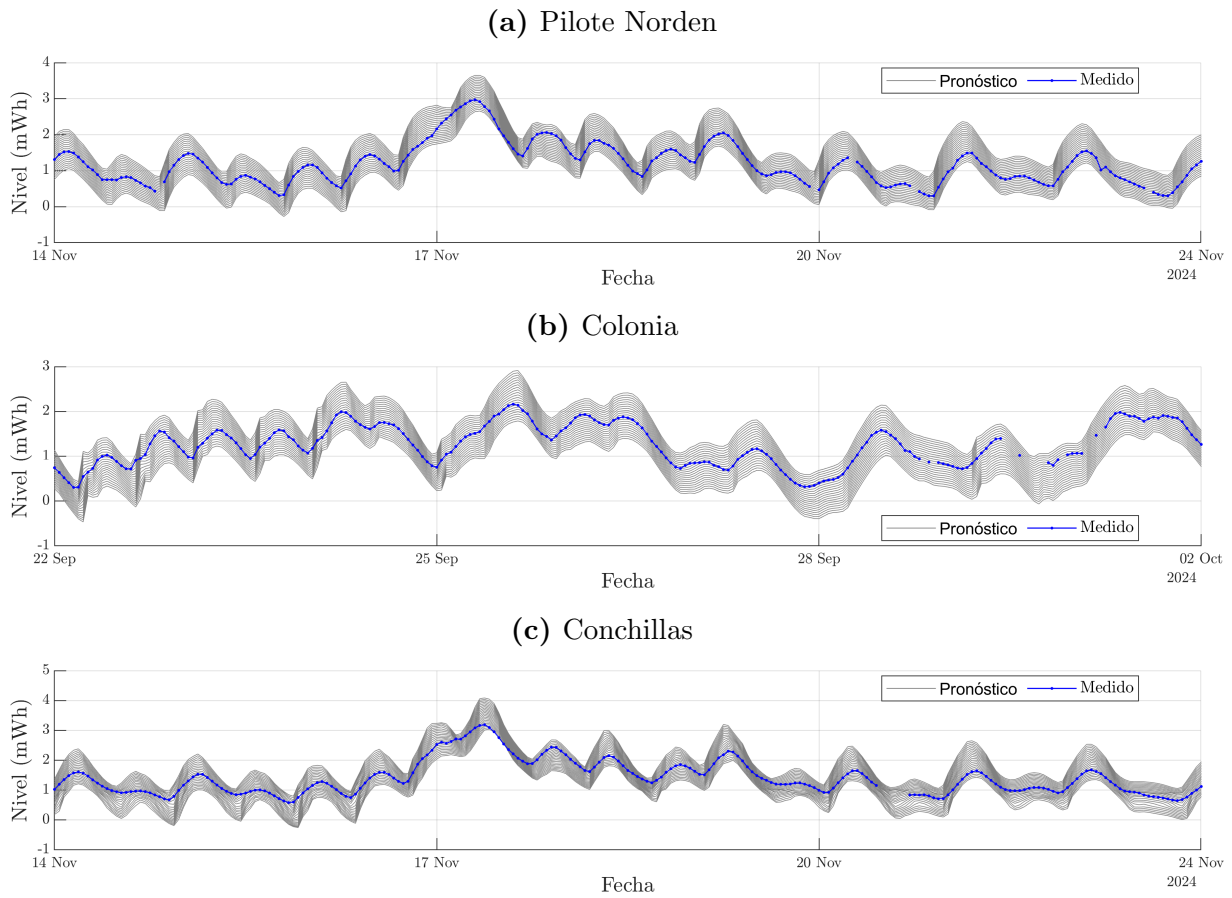


Figura 3: Ejemplos de estaciones donde el ensamble reproduce adecuadamente la dinámica observada.

En la estación Nueva Palmira, el modelo también representa la dinámica general, aunque se identifican limitaciones en la reproducción de eventos de nivel mínimo. En estos casos, la envolvente del ensamble presenta un límite inferior que no alcanza los valores observados, evidenciando una subestimación sistemática de las bajantes (Figura 4).

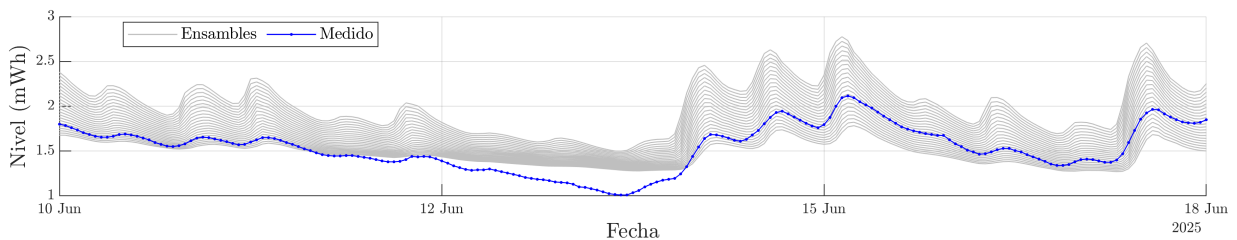


Figura 4: Ejemplo de subestimación de niveles mínimos en Nueva Palmira.

Este comportamiento indica que, si bien el ensamble captura adecuadamente la variabilidad asociada a niveles medios y altos, presenta limitaciones para representar condiciones

extremas de bajante, lo cual constituye una fuente de incertidumbre relevante para aplicaciones operativas.

4.2. Análisis del sesgo

Con el objetivo de cuantificar el desempeño del ensamble, se calculó el sesgo mensual para cada estación y para tres horizontes de pronóstico (24, 48 y 72 horas).

Los resultados muestran que el miembro del ensamble que minimiza el sesgo varía significativamente entre estaciones y a lo largo del tiempo. En particular, no se identifica un único miembro que presente un desempeño consistentemente superior en todos los casos.

Los resultados completos del sesgo mensual para cada estación y horizonte de pronóstico se presentan en el Anexo F.

4.3. Discusión

La variabilidad observada en el desempeño de los distintos miembros del ensamble refleja la sensibilidad del sistema a las condiciones de borde oceánicas, las cuales constituyen una de las principales fuentes de incertidumbre en la simulación del nivel.

En este contexto, la ausencia de un ensamble óptimo único indica que la selección de un único miembro no resulta adecuada para representar la dinámica del sistema de forma robusta.

4.4. Conclusión

Los resultados obtenidos muestran que el esquema de ensamble permite representar adecuadamente la dinámica del nivel en la mayor parte del dominio, aunque presenta limitaciones en la reproducción de eventos extremos de bajante.

Asimismo, la fuerte variabilidad del ensamble óptimo en el tiempo y entre estaciones evidencia que no existe un único miembro que minimice el error de forma consistente.

Estos resultados justifican la construcción de un pronóstico compuesto, basado en la combinación adaptativa de distintos miembros del ensamble, cuya metodología se presenta en la siguiente sección.

5. Metodología de selección dinámica de ensambles

Como se mencionó previamente, la utilización de un único ensamble no resulta suficiente para representar adecuadamente la dinámica temporal de cada estación en horizontes prolongados. Con el objetivo de superar esta limitación, se propone una metodología adaptativa basada en la evaluación diaria del desempeño de múltiples ensambles.

La idea central consiste en seleccionar, para cada día y estación, el ensamble que presenta el menor sesgo reciente, permitiendo así capturar cambios temporales en el comportamiento del sistema y mejorar la representatividad del pronóstico.

5.1. Metodología

Para cada estación y día de pronóstico, se evalúa el desempeño de los distintos ensambles considerando una ventana temporal de días previos. El criterio de selección se basa en el cálculo del sesgo (BIAS) entre los valores pronosticados y observados.

El sesgo de cada ensamble e en el instante t se define como:

$$BIAS_e(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N}^{t-1} (S_e(i) - O(i))$$

donde $S_e(i)$ es el nivel pronosticado por el ensamble e , $O(i)$ el nivel observado, y N la longitud de la ventana de evaluación. La ventana se aplica de forma deslizante en el tiempo. En caso de datos faltantes, el cálculo se realiza sobre los valores disponibles.

El ensamble seleccionado para cada instante t se define como aquel que minimiza el valor absoluto del sesgo:

$$e^*(t) = \text{mín} |BIAS_e(t)|$$

El procedimiento consiste en:

- Calcular el BIAS de cada ensamble utilizando información de días previos.
- Evaluar el desempeño de cada ensamble en la ventana temporal definida.
- Seleccionar el ensamble con menor valor absoluto de BIAS.

El ensamble seleccionado $e^*(t)$ se utiliza para generar el pronóstico completo de niveles para las siguientes 72 horas. Este procedimiento se repite de manera independiente para cada instante de emisión del pronóstico.

En situaciones donde no se dispone de información suficiente para realizar la evaluación, se adopta como criterio utilizar el último ensamble seleccionado.

5.2. Determinación de la ventana de evaluación

La longitud de la ventana temporal utilizada para evaluar el desempeño de los ensambles constituye un parámetro clave de la metodología.

Se analizaron distintas ventanas de evaluación (1, 3, 7, 10, 15, 20 y 30 días), cuyos resultados se presentan en el Anexo G.

A partir de dicho análisis se concluye que:

- La ventana de 1 día presenta alta variabilidad, mostrando sensibilidad a errores puntuales.
- Ventanas mayores o iguales a 15 días reducen la dispersión, pero pierden capacidad de adaptación.
- Las ventanas de 3, 7 y 10 días presentan el mejor compromiso entre estabilidad y adaptabilidad.

La comparación detallada entre estas alternativas (Anexo H) muestra que, si bien la ventana de 3 días presenta la mayor frecuencia de mejoras, la ventana de 7 días exhibe una menor dispersión del sesgo en los casos en los que resulta óptima, indicando un comportamiento más consistente.

Asimismo, la diferencia en frecuencia de mejora entre las ventanas de 3 y 7 días no resulta suficientemente significativa como para compensar el aumento en la variabilidad observado en la primera.

En función de este compromiso entre frecuencia de mejora y estabilidad del desempeño, se selecciona una ventana de evaluación de 7 días como configuración final de la metodología.

5.3. Limitaciones de la metodología

La metodología propuesta se basa en la selección del ensamble con mejor desempeño reciente, lo que implica una dependencia directa de la información observada en la ventana temporal previa al instante de pronóstico.

Este enfoque permite capturar cambios en la dinámica del sistema y adaptarse a distintas condiciones, pero también introduce un potencial riesgo de sobreajuste temporal (overfitting), en el sentido de que el ensamble seleccionado podría no mantener su desempeño en el horizonte de pronóstico si las condiciones cambian significativamente.

No obstante, la utilización de una ventana de evaluación de varios días (7 días en la configuración adoptada) actúa como un mecanismo de suavizado que reduce la sensibilidad a errores puntuales y mejora la robustez del criterio de selección.

Asimismo, la evaluación de resultados presentada permite verificar que, a pesar de esta limitación, la metodología muestra mejoras consistentes respecto al esquema operativo actual, tanto en términos de error medio como en la representación de eventos extremos.

En este sentido, el enfoque adoptado representa un compromiso entre adaptabilidad y robustez, adecuado para su aplicación en un contexto operativo.

6. Evaluación de resultados

6.1. Variabilidad del ensamble seleccionado

La variabilidad del ensamble seleccionado se analizó a partir de su evolución temporal en cada estación (ver Anexo I.1). Este análisis permite identificar patrones de estabilidad o alternancia en la selección diaria del ensamble.

En las estaciones de Pilote Norden, Colonia y Conchillas, el ensamble seleccionado se mantiene mayormente dentro de un rango acotado, lo que indica un comportamiento estable del sistema y una representación consistente de la dinámica local. En estos casos, no se observan cambios abruptos sostenidos, lo que sugiere una adecuada robustez del esquema de selección.

En contraste, en Nueva Palmira se observa una mayor dispersión en el ensamble elegido, con transiciones más frecuentes entre distintos miembros. Este comportamiento evidencia

una mayor sensibilidad a las condiciones dinámicas locales.

Asimismo, los cambios hacia ensambles de menor orden coinciden con períodos en los que el modelo presenta limitaciones para reproducir eventos de niveles bajos, tal como se discutió en la Sección 4.1. Esto sugiere que la variabilidad del ensamble seleccionado constituye un indicador indirecto del desempeño del sistema.

6.2. Régimen medio

El desempeño del sistema en condiciones medias se evaluó mediante el cálculo del BIAS y el RMSE (ver detalle completo en Anexo I.2).

En términos generales, los valores de $|\text{BIAS}|$ son bajos en todas las estaciones, indicando ausencia de sesgos sistemáticos significativos. Esto evidencia que la serie compuesta reproduce adecuadamente el nivel medio.

Las diferencias entre estaciones se manifiestan principalmente en el RMSE:

- Pilote Norden y Colonia presentan un comportamiento estable, con errores moderados y consistentes.
- Conchillas muestra la mayor dispersión, con episodios puntuales de error elevado.
- Nueva Palmira presenta el mejor desempeño global, con el menor RMSE total.

Estos resultados indican que el error está dominado principalmente por la variabilidad del sistema más que por errores sistemáticos.

6.3. Régimen extremal

La evaluación de eventos extremos se realizó mediante métricas derivadas de tablas de contingencia (ver Anexo I.3).

Tabla 1: Estadísticos de verificación (TS, HR y FAR) para eventos extremos máximos y mínimos.

Estación	Eventos máximos			Eventos mínimos		
	TS	HR (%)	FAR (%)	TS	HR (%)	FAR (%)
Pilote Norden	0.62	93	35	0.34	88	64
Colonia	0.75	90	18	0.47	100	53
Conchillas	0.46	100	54	0.16	100	84
Nueva Palmira	0.55	86	40	0.3	30	0

Para los eventos máximos, el sistema presenta un desempeño satisfactorio, con altos valores de HR en todas las estaciones. Colonia se destaca por el mejor equilibrio entre detección y falsas alarmas.

Para los eventos mínimos, el desempeño es más heterogéneo. En varias estaciones se observa una tendencia a sobreestimar eventos (FAR elevado), mientras que en Nueva Palmira se evidencia el comportamiento opuesto, con baja detección.

En conjunto, estos resultados indican que el sistema es más confiable en la detección de extremos máximos que mínimos, lo que sugiere mayores dificultades en la representación de los procesos asociados a niveles bajos.

7. Alternativa con forzante atmosférico WRF local

7.1. Forzante WRF

El forzante atmosférico utilizado corresponde a campos de viento superficial generados por el modelo mesoscalar Weather Research and Forecasting (WRF, versión 4.3), implementado para la región del Río de la Plata y la plataforma continental adyacente.

El sistema opera sobre un dominio regional con resolución horizontal de 12 km y 51 niveles verticales, con mayor refinamiento en la capa límite atmosférica. Las condiciones iniciales y de contorno provienen del modelo global GFS (0.5°), generando campos horarios de viento a 10 m (U10 y V10).

Estos campos se utilizan como forzante superficial del modelo hidrodinámico, permitiendo representar la variabilidad sinóptica y mesoscalar del viento, principal mecanismo

de forzante de las fluctuaciones de nivel.

7.2. Evaluación del desempeño con forzante WRF

El análisis del desempeño del sistema utilizando el forzante WRF indica que la metodología adaptativa mantiene un comportamiento consistente en las distintas estaciones, tanto en la selección del ensamble como en la calidad del pronóstico.

La variabilidad del ensamble seleccionado presenta distintos grados de dispersión según la estación (ver Anexo J.1). En general, estaciones como Pilote Norden muestran una mayor concentración en rangos acotados, mientras que Colonia y Conchillas exhiben mayor variabilidad. Nueva Palmira presenta fluctuaciones más marcadas, asociadas a cambios en las condiciones hidrodinámicas locales. Este comportamiento resulta consistente con el observado utilizando el forzante previo, lo que indica que la dinámica de selección está principalmente controlada por características propias del sistema.

En términos de régimen medio, la serie compuesta reproduce adecuadamente el nivel en todas las estaciones, con valores de $|\text{BIAS}|$ cercanos a cero y RMSE acotados (ver Anexo J.2). Las diferencias entre estaciones se reflejan principalmente en la magnitud del RMSE, siendo Conchillas la de mayor dispersión y Nueva Palmira la de mejor desempeño global. No se observan mejoras significativas respecto al forzante anterior, manteniéndose niveles de error comparables.

En cuanto al régimen extremal, el sistema presenta un buen desempeño en la detección de eventos máximos, con alta tasa de aciertos, aunque acompañado por una proporción no despreciable de falsas alarmas en algunas estaciones (ver Anexo J.3). Para los eventos mínimos, el desempeño es más limitado y heterogéneo, observándose en general una tendencia a la sobreestimación, mientras que en Nueva Palmira se evidencia subdetección. Este comportamiento es consistente con el obtenido previamente, sugiriendo que las principales limitaciones en la representación de extremos mínimos están asociadas a la dinámica del sistema más que al forzante atmosférico.

8. Comparación de resultados

El objetivo principal de esta evaluación es determinar en qué medida la implementación de la serie compuesta, forzada con distintos productos atmosféricos, mejora el desempeño respecto a la configuración actualmente operativa (Ensamble 90), tanto en términos de ajuste general como en la representación de eventos extremos.

8.1. Configuraciones analizadas

Se evaluaron tres configuraciones de simulación:

- **Ensamble 90 (Ens 90)**: esquema actualmente utilizado en la operativa.
- **Serie Compuesta forzada con NOAA (SC NOAA)**.
- **Serie Compuesta forzada con WRF (SC WRF)**.

Las configuraciones de serie compuesta incorporan una estrategia de combinación y ajuste de salidas, con el objetivo de reducir errores sistemáticos y mejorar la representación de la señal en distintas escalas temporales.

La comparación se realizó estación por estación, utilizando el mismo período de análisis para garantizar consistencia estadística.

8.2. Indicadores estadísticos de desempeño continuo

La Tabla 2 presenta la comparación de los principales indicadores estadísticos (R^2 , RMSE, MAE y BIAS) para las estaciones de Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira, considerando la simulación actualmente operativa (Ensamble 90) y las dos configuraciones de la serie compuesta (forzadas con NOAA y WRF).

En términos generales, la implementación de la serie compuesta produce una mejora consistente en el desempeño del modelo. Si bien el coeficiente de determinación (R^2) se mantiene prácticamente inalterado entre configuraciones, se observa una reducción sistemática del RMSE y del MAE en la mayoría de las estaciones, junto con una corrección significativa del sesgo, que pasa de valores positivos en el Ensamble 90 a valores cercanos a cero en las series compuestas.

Las mejoras son particularmente marcadas en Nueva Palmira, donde se registra una disminución sustancial de los errores. En Pilote Norden y Colonia, la reducción del error es moderada pero consistente, mientras que en Conchillas la mejora es más acotada y depende del forzante, siendo la configuración con WRF la que presenta mejor desempeño.

En conjunto, estos resultados indican que la serie compuesta mejora la representación del nivel, principalmente a través de la reducción del error y la eliminación del sesgo sistemático, sin modificar significativamente la capacidad explicativa global del modelo.

Tabla 2: Comparación del desempeño estadístico de las configuraciones Ensemble 90, serie compuesta forzada con NOAA y con WRF en Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira, según indicadores de ajuste y error

	R ²	RMSE (mWh)	MAE (mWh)	BIAS (mWh)
Pilote Norden				
Ens 90	0,92	0,19	0,15	0,12
SC NOAA	0,92	0,15	0,11	0,00
SC WRF	0,91	0,15	0,11	0,00
Colonia				
Ens 90	0,92	0,16	0,12	0,06
SC NOAA	0,92	0,14	0,11	-0,01
SC WRF	0,91	0,14	0,11	0,00
Conchillas				
Ens 90	0,86	0,21	0,15	0,06
SC NOAA	0,85	0,21	0,15	0,00
SC WRF	0,86	0,19	0,14	0,00
Nueva Palmira				
Ens 90	0,88	0,19	0,16	0,14
SC NOAA	0,87	0,13	0,10	0,00
SC WRF	0,86	0,13	0,10	0,00

8.3. Análisis de la variabilidad diaria del error

El análisis de la variabilidad diaria del error muestra que la serie compuesta reduce el sesgo y la dispersión respecto a la configuración operativa (ver Figuras 5 y 6).

En términos generales, las configuraciones compuestas presentan medianas de bias más próximas a cero y una menor dispersión en la mayoría de las estaciones, lo que indica una mejora en la estabilidad del desempeño. Asimismo, se observa una reducción del RMSE

diario, reflejando una mejor representación global de la señal.

Las diferencias entre los forzantes NOAA y WRF son, en general, moderadas, aunque se identifican variaciones locales en la dispersión del error y en la presencia de valores extremos. En particular, Conchillas continúa mostrando episodios puntuales de error elevado en todas las configuraciones.

Estos resultados confirman que la mejora introducida por la serie compuesta no solo se refleja en métricas agregadas, sino también en la consistencia temporal del modelo.

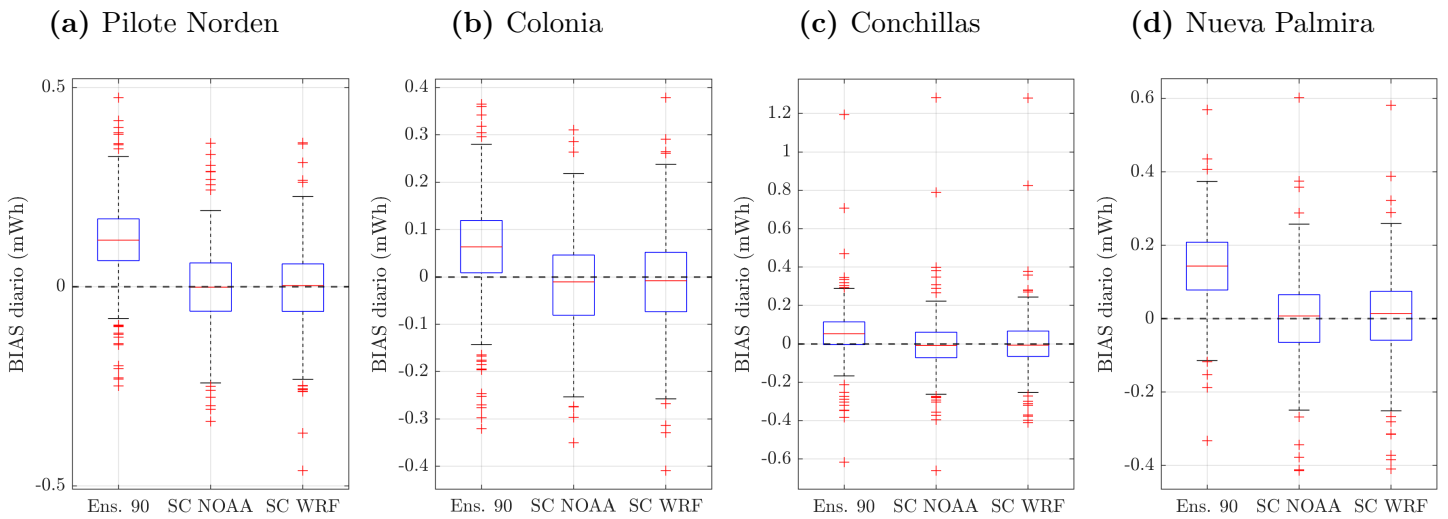


Figura 5: Dispersión del bias diario para la serie actualmente usada y la serie compuesta.

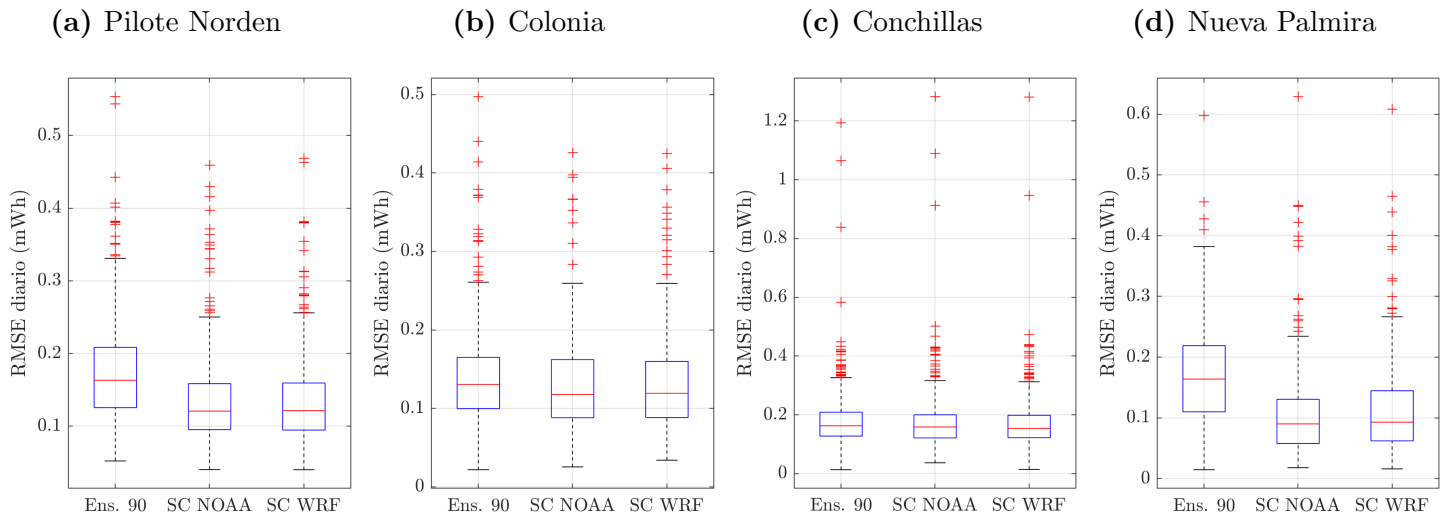


Figura 6: Dispersión del RMSE diario para la serie actualmente usada y la serie compuesta.

8.4. Evaluación distribucional mediante gráficos Q–Q

Los gráficos Q–Q (Figuras 7 y 8) muestran que las series compuestas reproducen mejor la distribución de los niveles observados en comparación con la simulación Ensamble 90.

En general, se observa una mayor alineación con la recta 1:1 en todo el rango de cuantiles, lo que indica una mejora en el ajuste global de la distribución. No obstante, persisten desviaciones en los extremos, particularmente asociadas a una sobreestimación de los niveles más altos y, en algunas estaciones, a dificultades en la representación de niveles bajos.

Las diferencias entre los forzantes NOAA y WRF son relativamente pequeñas, aunque se identifican comportamientos diferenciados en ciertos rangos de la distribución según la estación.

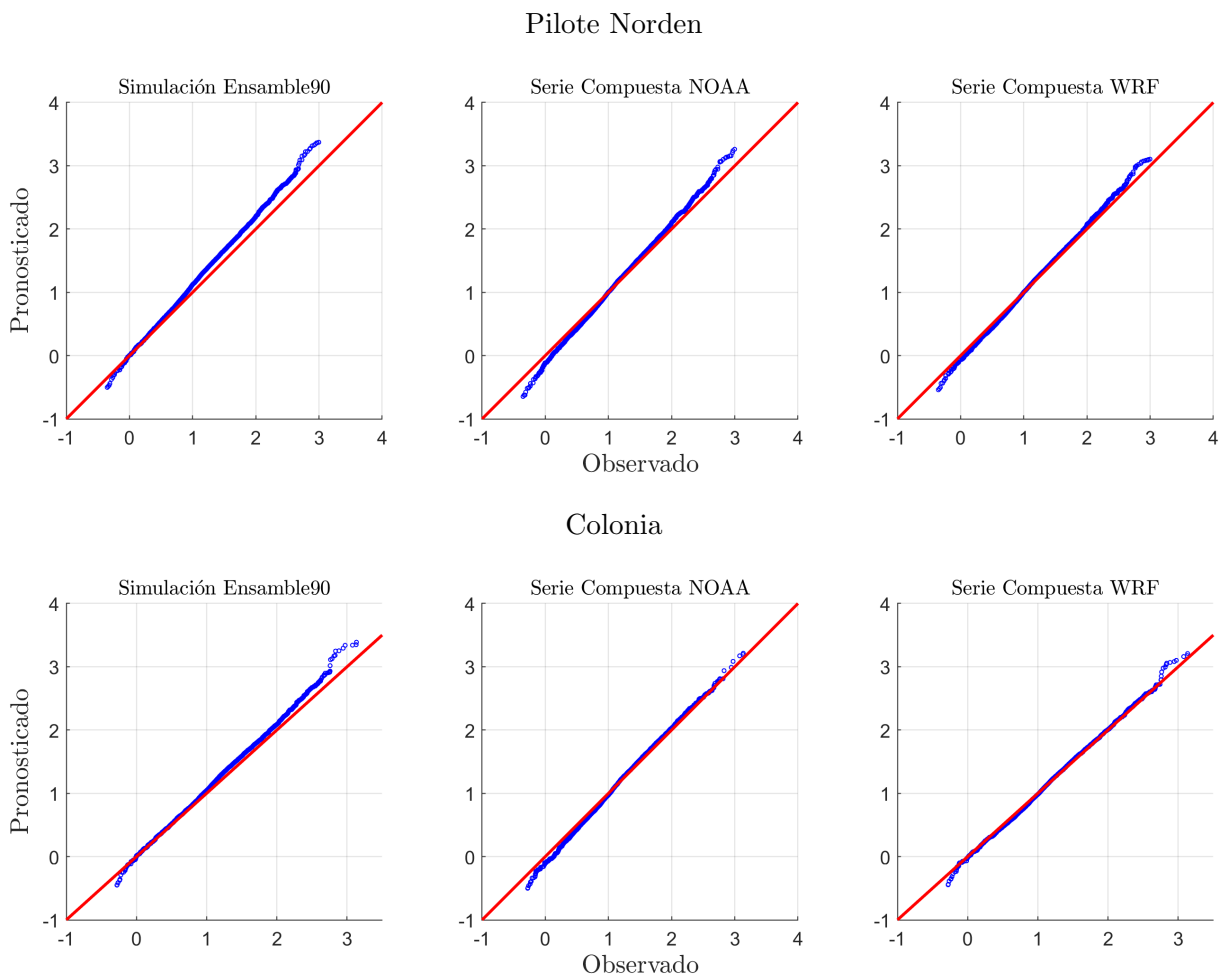


Figura 7: Gráficos Q-Q entre los niveles observados y los niveles pronosticados para las estaciones de Pilote Norden y Colonia. Cada fila corresponde a una estación y cada columna a una alternativa de pronóstico: Simulación Ensemble90, Serie Compuesta forzada con NOAA y Serie Compuesta forzada con WRF. La recta roja indica la correspondencia 1:1.

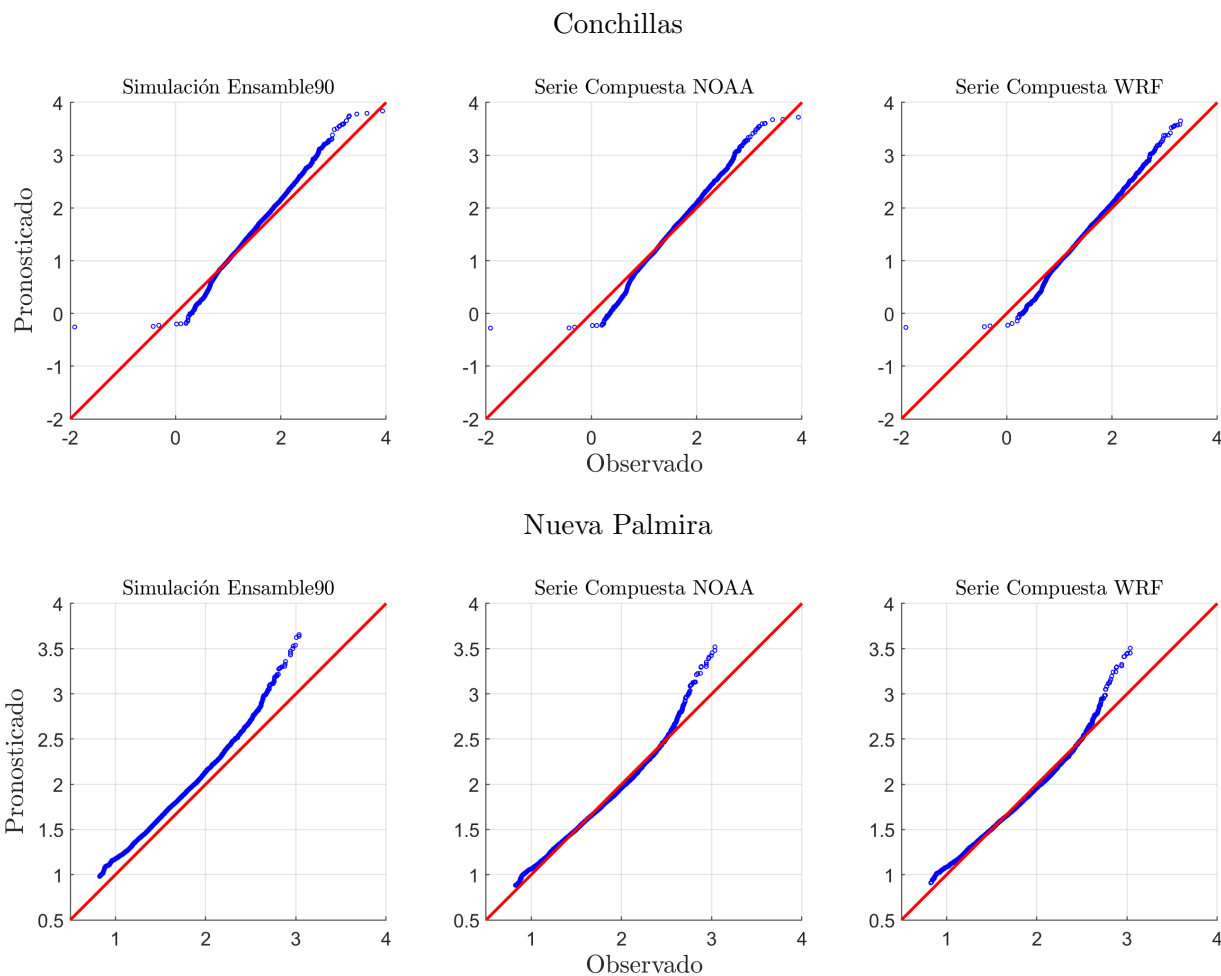


Figura 8: Gráficos Q-Q entre los niveles observados y los niveles pronosticados para las estaciones de Conchillas y Nueva Palmira. Cada fila corresponde a una estación y cada columna a una alternativa de pronóstico: Simulación Ensemble90, Serie Compuesta forzada con NOAA y Serie Compuesta forzada con WRF. La recta roja indica la correspondencia 1:1.

8.5. Evaluación del régimen extremal

La evaluación de eventos extremos muestra comportamientos diferenciados entre máximos y mínimos.

Para los eventos máximos, las series compuestas presentan en general una mejora respecto al Ensemble 90, evidenciada por un aumento del Threat Score (TS) y una reducción de la tasa de falsas alarmas (FAR), aunque en algunos casos con una leve disminución del Hit Rate (HR). Este comportamiento indica un mejor equilibrio entre detección y sobreestimación de eventos.

En particular, la configuración forzada con WRF tiende a mostrar el mejor desempeño en varias estaciones, principalmente debido a una reducción más marcada de las falsas alarmas.

Para los eventos mínimos, el desempeño es más heterogéneo. En la mayoría de las estaciones, las series compuestas presentan una mayor tasa de falsas alarmas que el Ensemble 90, lo que reduce el TS, aunque mantienen una buena capacidad de detección. La excepción es Nueva Palmira, donde las series compuestas mejoran significativamente el desempeño respecto al esquema actual, que no logra detectar estos eventos.

En conjunto, los resultados indican que la serie compuesta mejora la representación de extremos máximos, mientras que la simulación operativa mantiene en general un mejor equilibrio en la detección de mínimos, evidenciando limitaciones persistentes en la modelación de estos eventos.

Las tablas de contingencia correspondientes a los eventos máximos y mínimos se presentan en el anexo K.

Tabla 3: Estadísticos de verificación (TS, HR y FAR) para eventos extremos máximos y mínimos de la serie compuesta y el ensemble 90.

Estación	Eventos máximos			Eventos mínimos		
	TS	HR (%)	FAR (%)	TS	HR (%)	FAR (%)
Pilote Norden						
Ens 90	0,54	100	46	0,64	88	30
SC NOAA	0,62	93	35	0,34	88	64
SC WRF	0,65	93	32	0,39	75	56
Colonia						
Ens 90	0,73	100	27	0,64	100	36
SC NOAA	0,75	90	18	0,47	100	53
SC WRF	0,67	80	20	0,47	100	53
Conchillas						
Ens 90	0,43	100	57	0,26	100	74
SC NOAA	0,46	100	54	0,16	100	84
SC WRF	0,58	100	42	0,18	100	82
Nueva Palmira						
Ens 90	0,42	100	58	0,00	0	-
SC NOAA	0,55	86	40	0,30	30	0
SC WRF	0,63	86	29	0,20	20	0

9. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten confirmar parcialmente la hipótesis planteada, evidenciando que la implementación de una serie compuesta basada en selección dinámica de ensambles mejora el desempeño del sistema de pronóstico de niveles respecto a la configuración actualmente operativa (Ensamble 90).

En términos cuantitativos, la serie compuesta reduce el RMSE en todas las estaciones analizadas, con mejoras del orden del 10 % al 30 %, alcanzando su mayor impacto en Nueva Palmira, donde el error disminuye aproximadamente un 30 %. Asimismo, se elimina el sesgo sistemático presente en el esquema base, con valores de BIAS cercanos a cero, sin degradar el coeficiente de determinación.

En relación con los eventos extremos, se observa una mejora consistente en la detección de máximos. Los valores de TS aumentan en todas las estaciones, destacándose Nueva Palmira (0.42 a 0.63) y Pilote Norden (0.54 a 0.65), mientras que la tasa de falsas alarmas (FAR) se reduce significativamente, evidenciando una mejora en la confiabilidad del sistema.

En contraste, la representación de eventos mínimos presenta limitaciones relevantes. En varias estaciones se observa un incremento en la tasa de falsas alarmas, así como comportamientos inconsistentes en la detección, lo que indica dificultades del sistema para capturar adecuadamente condiciones de niveles bajos. Este comportamiento sugiere limitaciones en la representación de los procesos físicos asociados, posiblemente vinculadas a forzantes hidrológicos o condiciones de borde.

Respecto al forzante atmosférico, las diferencias entre las configuraciones basadas en productos globales (NOAA) y regionales (WRF) son, en general, reducidas en términos de error medio. No obstante, el uso de WRF muestra mejoras adicionales en la detección de eventos extremos máximos, particularmente en la reducción del FAR, sin afectar negativamente el desempeño global.

En conjunto, los resultados indican que la serie compuesta constituye una mejora significativa respecto al esquema operativo actual, especialmente en la reducción del error y en la representación de eventos extremos máximos. Desde el punto de vista operativo, esto se traduce en una mayor confiabilidad en la estimación de niveles y, por ende, en una

mejor determinación del calado disponible.

Sin embargo, persisten limitaciones en la representación de eventos extremos mínimos, lo que constituye una línea prioritaria de trabajo futuro para mejorar la robustez del sistema en todo el rango de condiciones.

El principal aporte de este trabajo radica en la implementación de una metodología adaptativa de selección de ensambles que permite construir una serie compuesta de pronóstico en función del desempeño reciente de los distintos miembros. A diferencia de los enfoques tradicionales basados en la utilización de un único miembro o en combinaciones fijas, la estrategia propuesta selecciona dinámicamente el miembro más representativo en cada instante, permitiendo capturar cambios en la dinámica del sistema y reducir errores asociados a condiciones de borde inciertas. Asimismo, se presenta una evaluación sistemática de su impacto en la calidad del pronóstico, tanto en términos de error medio como en la representación de eventos extremos, en un contexto operativo relevante para la navegación en el Río de la Plata.

10. Posibles mejoras

A partir del análisis realizado, se identifican líneas de mejora orientadas a optimizar el desempeño del sistema, principalmente en la representación de la variabilidad hidrológica y de eventos extremos, así como en la extensión del horizonte de pronóstico.

10.1. Incorporación de pronóstico de caudales del río Uruguay

El nivel en el entorno de Nueva Palmira presenta una fuerte dependencia del caudal del río Uruguay. En la configuración actual, se utiliza el valor observado del día anterior, mantenido constante durante el pronóstico.

La incorporación de pronósticos de caudal, por ejemplo a partir de los planes de erogación de la represa de Salto Grande, permitiría representar variaciones temporales dentro de la ventana de simulación, mejorando la estimación del nivel medio y la respuesta ante cambios abruptos. Asimismo, esta información habilitaría la extensión del horizonte de pronóstico más allá de las 72 horas actuales, manteniendo coherencia con la evolución esperada del sistema hidrológico.

10.2. Refinamiento de la malla y actualización batimétrica

El Canal Martín García es una zona sensible a la representación geométrica y a la batimetría. El refinamiento de la malla y la incorporación de información batimétrica actualizada, especialmente en sectores dragados, permitirían mejorar la propagación de la señal y la representación de gradientes de nivel.

10.3. Validación con información satelital

La evaluación actual se basa en estaciones puntuales. La incorporación de datos satelitales permitiría analizar la coherencia espacial del campo de niveles y detectar posibles inconsistencias en la representación regional del sistema.

10.4. Mejoras en la representación de eventos extremos

Los resultados evidencian limitaciones en la representación de eventos extremos, especialmente mínimos. El desarrollo de configuraciones específicas o esquemas de activación para estos casos podría mejorar la capacidad de detección y reducir errores asociados.

10.5. Esquemas adaptativos de ensamble

La implementación de un esquema adaptativo, en el cual el número de miembros del ensamble dependa de las condiciones hidrometeorológicas, permitiría optimizar recursos y mejorar la representación en situaciones de alta variabilidad.

En conjunto, estas mejoras representan una evolución progresiva del sistema, orientada a fortalecer su desempeño sin requerir modificaciones estructurales del modelo.

11. Referencias

Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP). El canal Martín García. <https://www.comisionriodelaplata.org/elcanal.php>, s.f.

Administración Nacional de Puertos (ANP). Puerto de Nueva Palmira. <https://www.anp.com.uy>, s.f. Información oficial sobre terminales, tipos de carga y capacidades.

Open TELEMAC-MASCARET Consortium. Presentation of the telemac-mascaret system, 2026. URL <https://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17>. Accessed: 2026-04-28.

M. Ballesteros. Sistema de pronóstico de los niveles de marea en tiempo real en el río de la Plata. Tesis de maestría, Universidad de la República (Uruguay), Facultad de Ingeniería, 2021.

J. Hervouet. *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method*. Wiley, 2007.

L. Sellanes. Implementación de un nuevo prototipo del pronóstico operacional de niveles en el río de la Plata y frente marítimo: Pronuy rpfm. Informe de pasantía, Universidad de la República (Uruguay), Facultad de Ingeniería, 2023.

HYCOM Consortium. Hybrid coordinate ocean model (hycom), 2024. URL <https://www.hycom.org/>. Visitado: 2026-04-28.

AVISO⁺ / CNES. Global tide fes2014: Description, 2016. URL <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html>. Visitado: 2026-04-28.

Martin Leutbecher and Timothy N. Palmer. Ensemble forecasting. *Journal of Computational Physics*, 227(7):3515–3539, 2008. 10.1016/j.jcp.2007.02.014.

Anexos

A. Datos y estaciones utilizadas

En este anexo se describen las estaciones de nivel utilizadas en el análisis, así como las fuentes de datos y su disponibilidad durante el período de estudio.

Los registros de nivel fueron obtenidos de las plataformas de la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP)¹ y la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU)², correspondientes a las estaciones ubicadas a lo largo del Canal Martín García (ver Figura 1). Los datos presentan una resolución temporal horaria. El período analizado abarca desde el 15 de octubre de 2023 hasta el 15 de enero de 2026, seleccionado en función de la mayor disponibilidad de datos simultáneos entre estaciones.

La Tabla 4 resume las principales características de las estaciones consideradas.

Tabla 4: Estaciones utilizadas en el análisis.

Estación	Sigla	Fuente	Cota cero (mWh)	Datos (%)
Pilote Norden	PNr	CARP	+0.42	99
Colonia	Col	CARP	+0.45	85
Conchillas	Con	CARP	+0.60	86
Carmelo	Car	CARP	+0.84	28
Nueva Palmira	NPa	CARU	+0.72	92

B. Análisis de niveles observados

La Figura 9 muestra la evolución temporal completa de los niveles registrados en las estaciones del canal durante el período analizado.

¹<https://www.comisionriodelaplata.org/>, visitado en agosto del 2025.

²<http://190.0.152.194:8080/alturas/web/user/alturas>, visitado en agosto del 2025

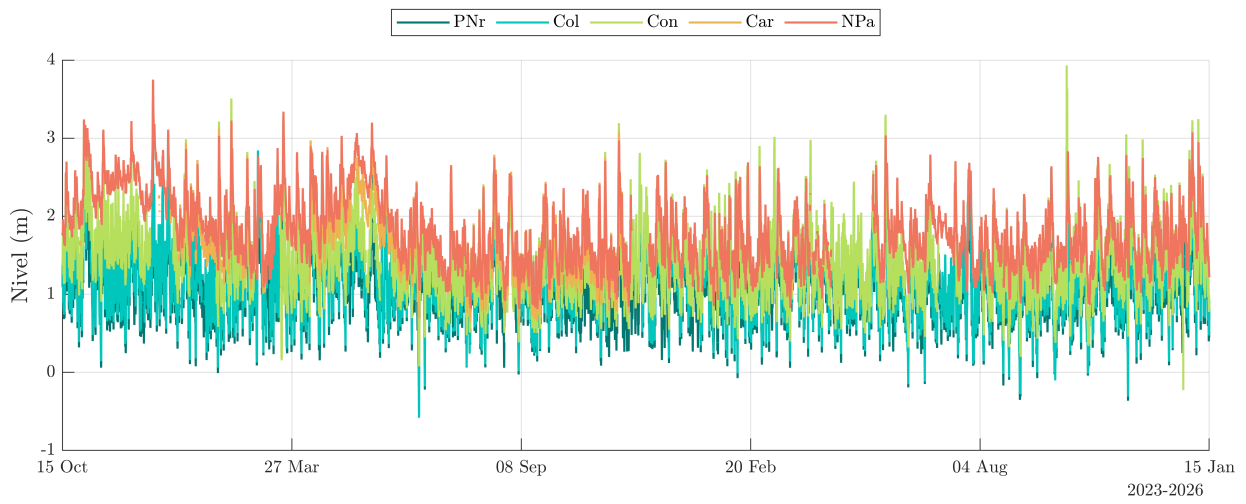


Figura 9: Serie temporal de niveles observados en las estaciones del canal Martín García.

A continuación, se presentan intervalos representativos que permiten visualizar en mayor detalle la coherencia espacial, las diferencias de amplitud y el desfase temporal entre estaciones.

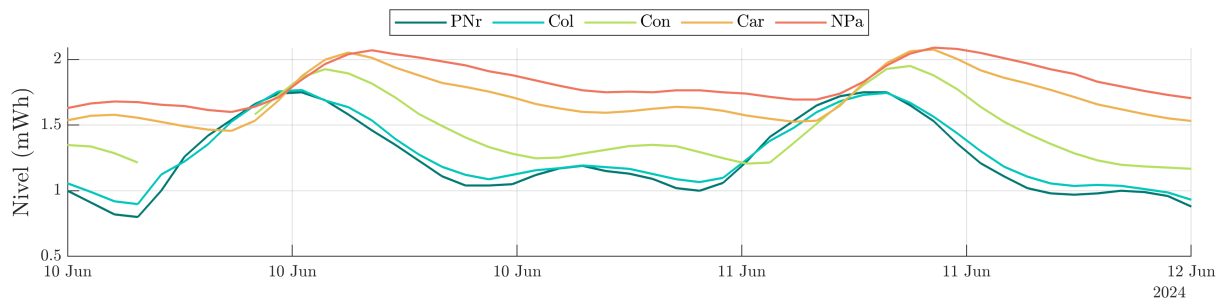


Figura 10: Ejemplo de desfase temporal en la propagación de la señal de nivel.

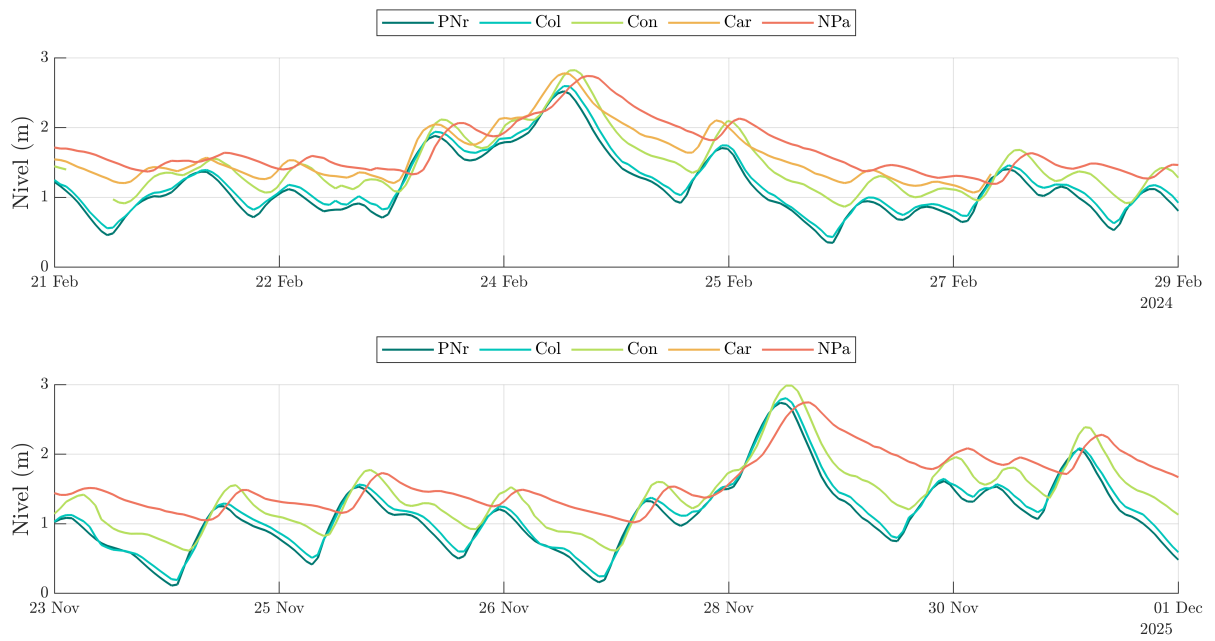


Figura 11: Ejemplos de intervalos temporales representativos de la dinámica del nivel en el canal.

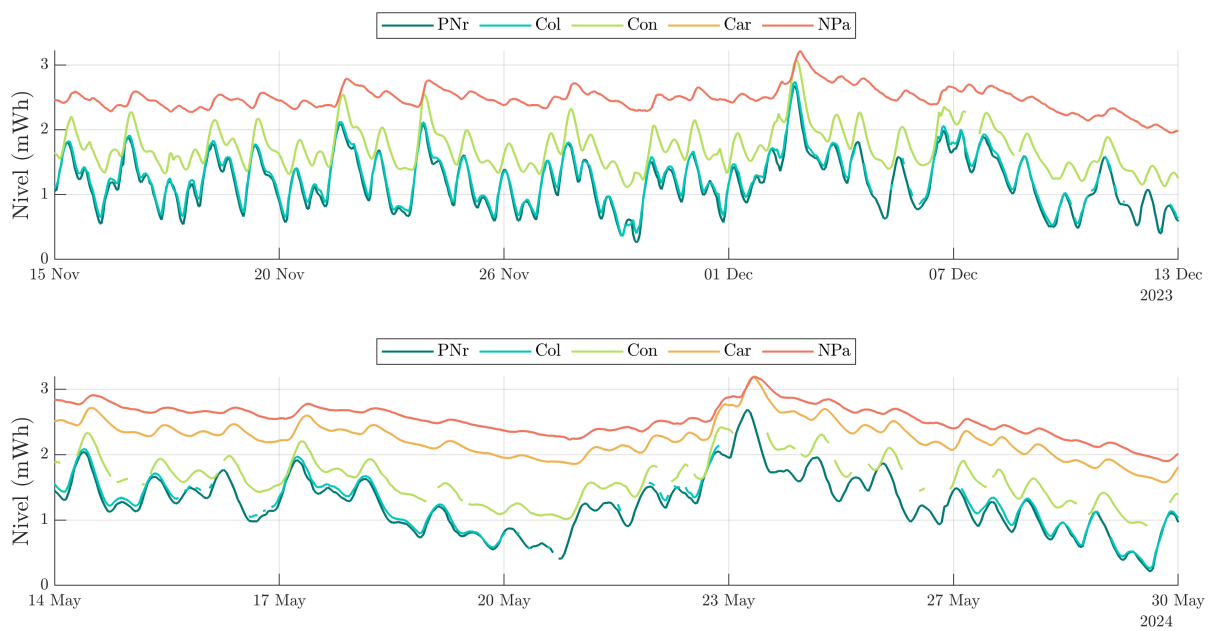


Figura 12: Intervalos con oscilaciones atenuadas en las estaciones del canal.

C. Estandarización de niveles

Con el objetivo de facilitar la comparación entre estaciones, los niveles fueron estandarizados mediante:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

donde x es el nivel observado, μ la media y σ la desviación estándar de la serie.

La Tabla 5 presenta los valores utilizados para cada estación.

Estación	Media (mWh)	Desviación (mWh)
Pilote Norden	1,14	0,48
Colonia	1,20	0,48
Conchillas	1,42	0,46
Carmelo	1,65	0,46
Nueva Palmira	1,79	0,46

Tabla 5: Parámetros de estandarización de niveles.



Figura 13: Niveles estandarizados en intervalos representativos.

D. Relación entre caudal y nivel

Se analizó la relación entre los niveles estandarizados y las anomalías de caudal de los ríos Uruguay y Paraná.

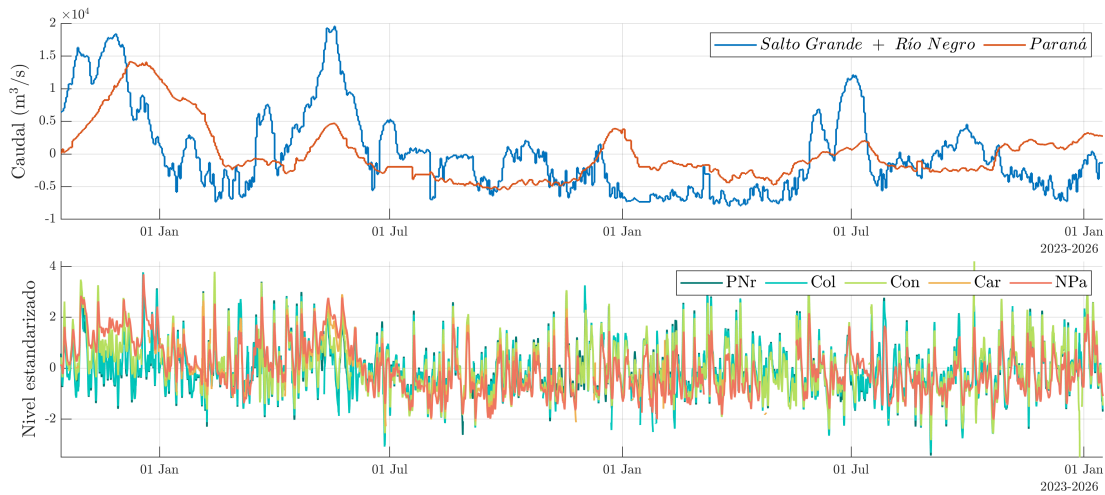


Figura 14: Comparación general entre caudal y nivel estandarizado.

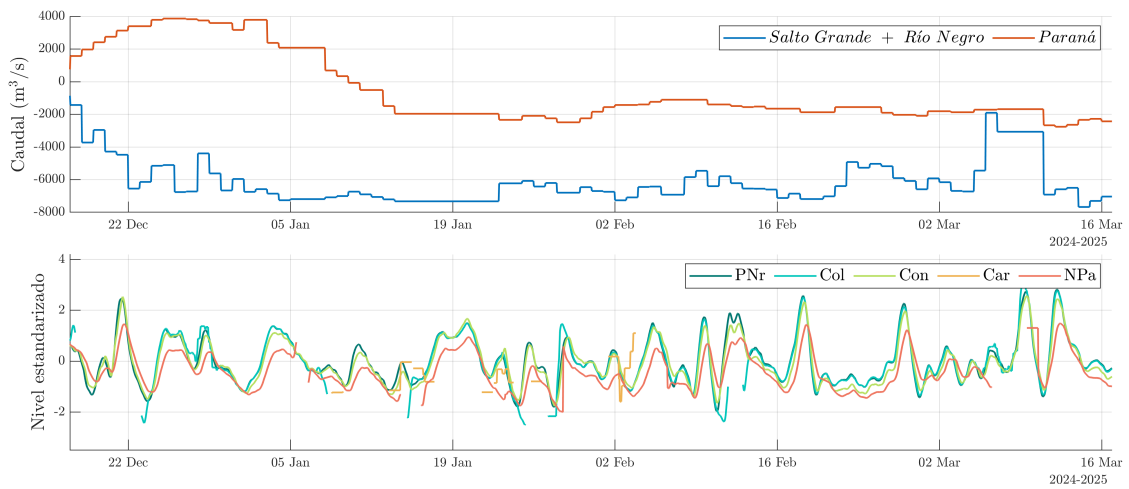


Figura 15: Ejemplo de período con caudales bajos.

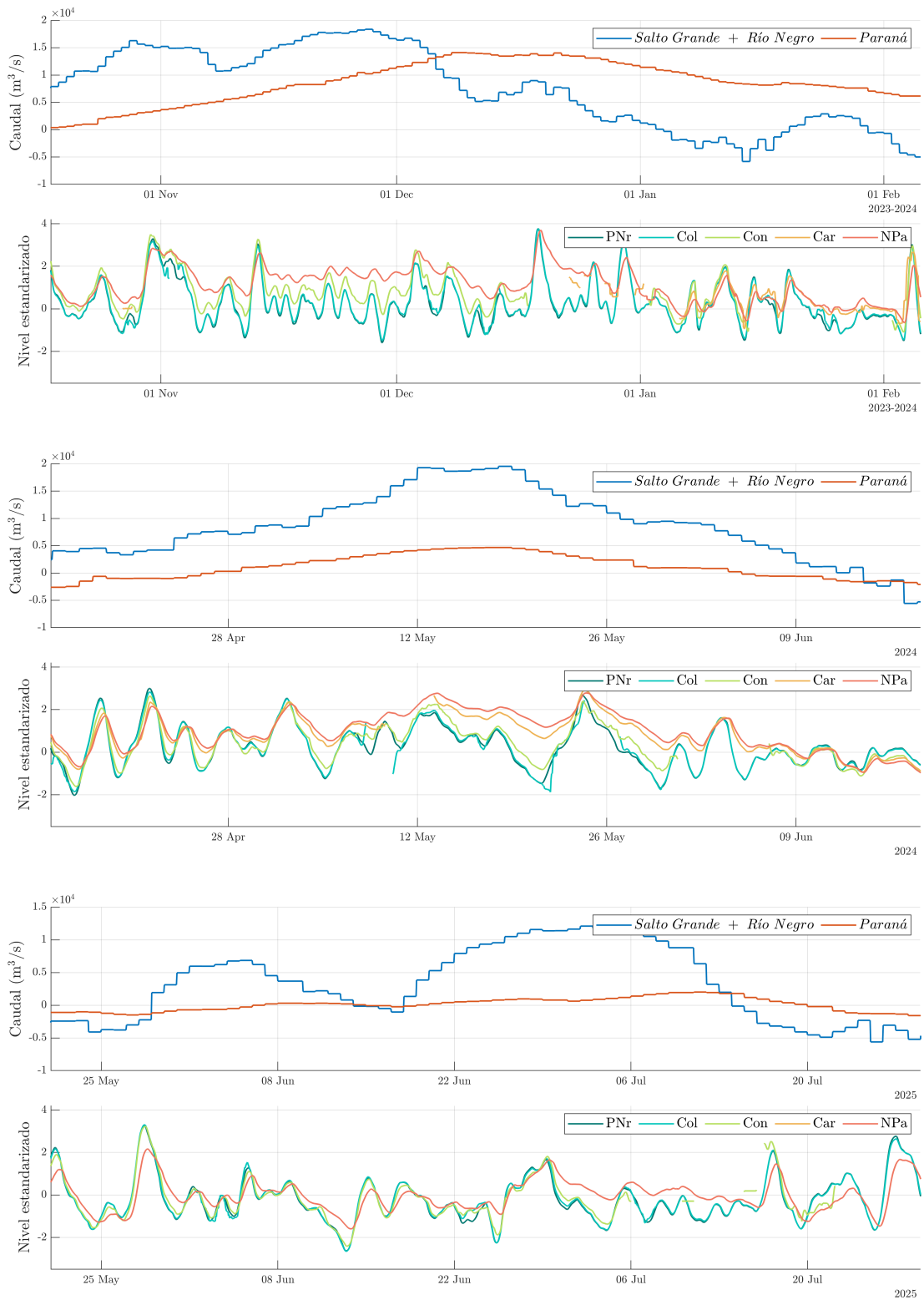


Figura 16: Ejemplos de períodos con caudales elevados.

E. Relación entre viento y nivel

La Figura 17 muestra la distribución direccional e intensidad del viento en las estaciones consideradas.

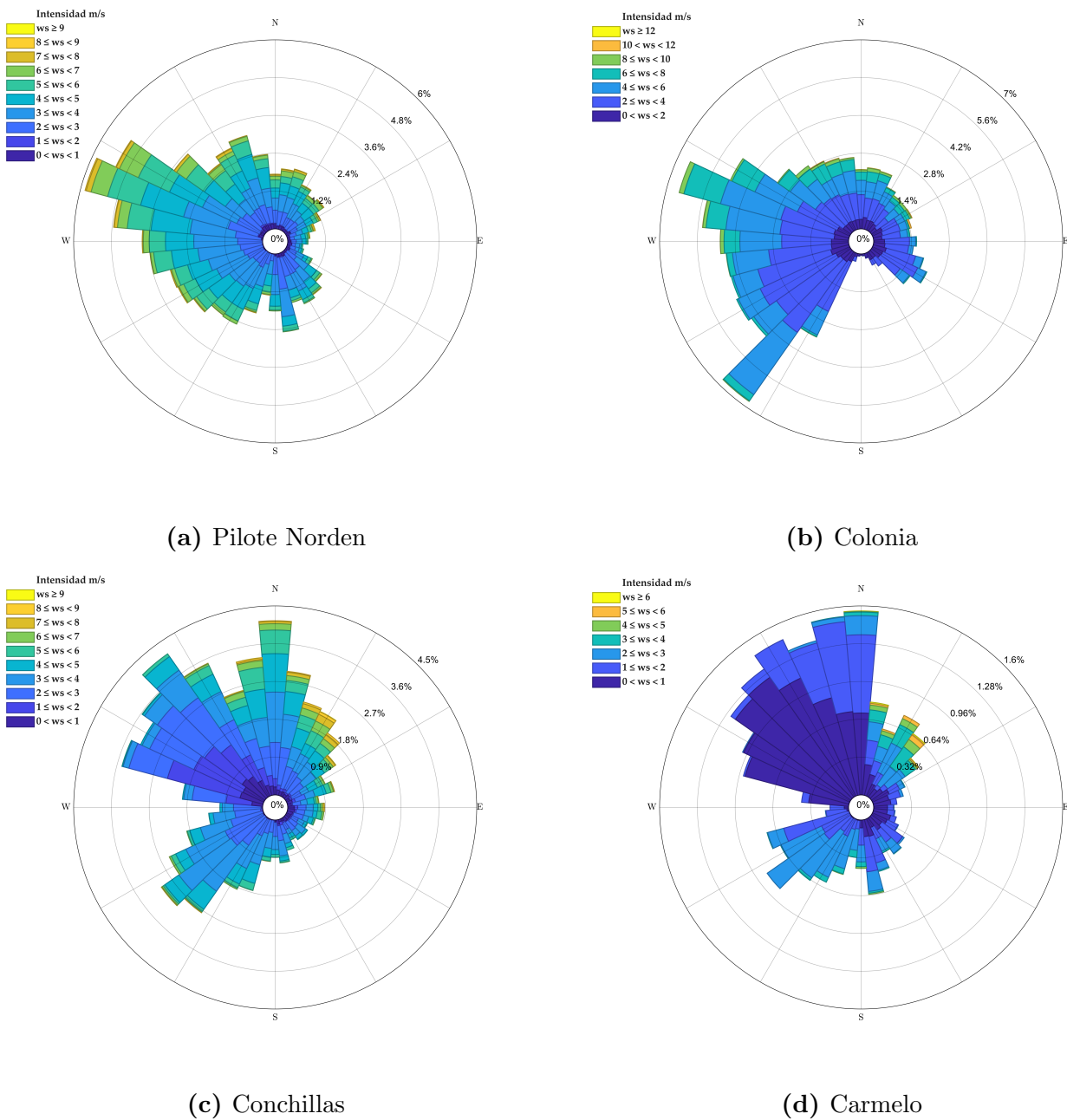


Figura 17: Rosas de viento en las estaciones analizadas.

La Figura 18 presenta la relación nivel del mar–intensidad del viento en cuatro estaciones del canal, incluyendo datos completos (gris) y eventos extremos (percentiles 1 % y 99 %, en color).

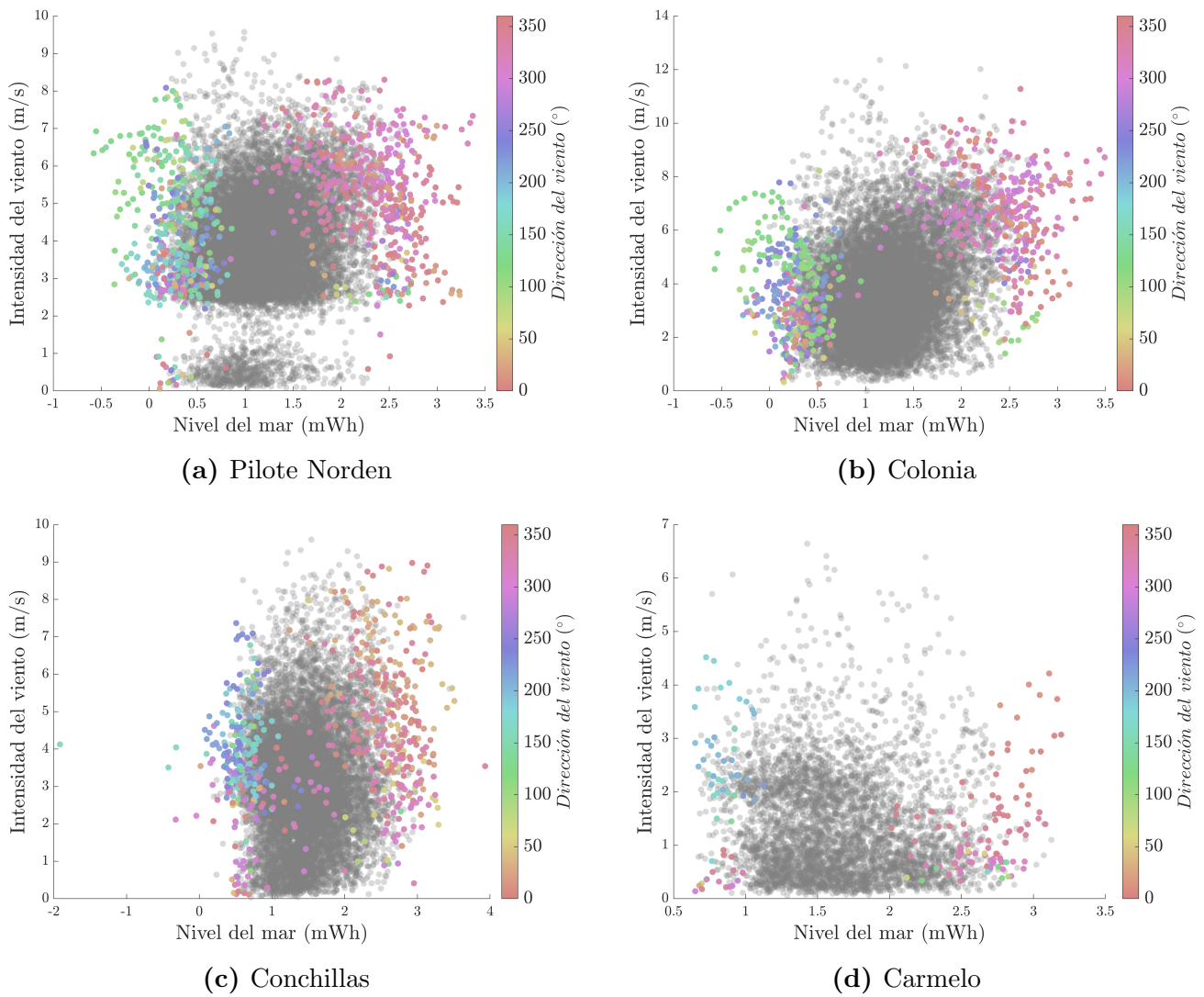


Figura 18: Relación entre viento y niveles extremos.

F. Evaluación del sesgo del ensamble

En este anexo se presentan los resultados completos del cálculo de sesgo mensual para cada estación y horizonte de pronóstico (24, 48 y 72 horas), considerando los 22 miembros del ensamble.

F.1. Pilote Norden

La Tabla 6 muestra una baja variabilidad en el ensamble óptimo, con valores que oscilan entre 70 y 90.

Tabla 6: Sesgo mensual en la estación Pilote Norden para el período evaluado y los tres horizontes de pronóstico considerados. El ensamble con el menor sesgo mensual se indica en verde oscuro, mientras que los ensambles con valores de sesgo próximos a este se muestran en verde claro.

Ens.	2024			2025									
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.
Primer día de pronóstico													
70	-0,12	-0,09	-0,14	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,09	-0,06	-0,07	-0,12	-0,12	-0,20
75	-0,07	-0,04	-0,09	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05	-0,04	-0,01	-0,02	-0,07	-0,07	-0,15
80	-0,02	0,01	-0,04	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,04	0,03	-0,02	-0,02	-0,10
85	0,03	0,06	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,09	0,08	0,02	0,03	-0,05
90	0,08	0,10	0,05	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,14	0,13	0,07	0,08	0,00
95	0,13	0,15	0,10	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,19	0,18	0,12	0,13	0,05
Segundo día de pronóstico													
70	-0,13	-0,09	-0,16	-0,12	-0,10	-0,11	-0,09	-0,09	-0,06	-0,07	-0,13	-0,12	-0,21
75	-0,08	-0,04	-0,11	-0,07	-0,05	-0,07	-0,04	-0,04	-0,01	-0,02	-0,08	-0,07	-0,16
80	-0,03	0,01	-0,06	-0,02	0,00	-0,02	0,01	0,01	0,04	0,03	-0,02	-0,02	-0,11
85	0,01	0,05	-0,01	0,03	0,05	0,03	0,06	0,06	0,09	0,08	0,02	0,03	-0,07
90	0,06	0,10	0,04	0,08	0,10	0,08	0,11	0,11	0,14	0,13	0,07	0,07	-0,02
95	0,11	0,15	0,09	0,13	0,15	0,13	0,16	0,15	0,19	0,17	0,12	0,12	0,03
Tercer día de pronóstico													
75	-0,11	-0,06	-0,15	-0,08	-0,07	-0,09	-0,05	-0,07	-0,03	-0,03	-0,10	-0,09	-0,16
80	-0,06	-0,01	-0,10	-0,03	-0,02	-0,04	-0,01	-0,02	0,02	0,02	-0,05	-0,04	-0,11
85	-0,01	0,04	-0,05	0,02	0,02	0,01	0,04	0,03	0,07	0,07	0,00	0,01	-0,06
90	0,04	0,09	0,00	0,07	0,07	0,06	0,09	0,08	0,12	0,12	0,05	0,06	-0,01
95	0,09	0,13	0,05	0,12	0,12	0,11	0,14	0,13	0,17	0,17	0,10	0,11	0,04

F.2. Colonia

La Tabla 7 muestra que al igual que en Pilote Norden, en Colonia la variabilidad es baja, con ensambles óptimos que oscilan entre 75 y 95.

Tabla 7: Sesgo mensual en la estación Colonia para el período evaluado y los tres horizontes de pronóstico considerados. El ensamble con el menor sesgo mensual se indica en verde oscuro, mientras que los ensambles con valores de sesgo próximos a este se muestran en verde claro.

Ens.	2024			2025									
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.
Primer día de pronóstico													
75	-0,07	-0,06	-0,11	-0,10	-0,09	-0,09	-0,08	-0,07	-0,03	-0,04	-0,09	-0,08	-0,18
80	-0,02	-0,01	-0,06	-0,05	-0,04	-0,04	-0,03	-0,02	0,02	0,01	-0,04	-0,03	-0,13
85	0,03	0,04	-0,02	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,07	0,06	0,01	0,02	-0,08
90	0,08	0,09	0,03	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,12	0,10	0,06	0,06	-0,03
95	0,13	0,13	0,08	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,17	0,15	0,10	0,11	0,02
100	0,18	0,18	0,13	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,22	0,20	0,15	0,16	0,07
Segundo día de pronóstico													
70	-0,13	-0,10	-0,18	-0,14	-0,13	-0,14	-0,11	-0,12	-0,07	-0,09	-0,14	-0,12	-0,24
75	-0,08	-0,05	-0,13	-0,09	-0,09	-0,09	-0,07	-0,07	-0,02	-0,04	-0,09	-0,07	-0,19
80	-0,03	0,00	-0,08	-0,04	-0,04	-0,04	-0,02	-0,02	0,03	0,01	-0,04	-0,03	-0,14
85	0,02	0,05	-0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,08	0,05	0,00	0,02	-0,09
90	0,07	0,09	0,02	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,13	0,10	0,05	0,06	-0,05
95	0,12	0,14	0,07	0,10	0,11	0,10	0,13	0,12	0,17	0,15	0,10	0,11	0,00
100	0,16	0,19	0,11	0,15	0,16	0,15	0,18	0,17	0,22	0,20	0,15	0,16	0,05
Tercer día de pronóstico													
75	-0,09	-0,04	-0,17	-0,11	-0,12	-0,11	-0,08	-0,10	-0,05	-0,05	-0,11	-0,10	-0,18
80	-0,04	0,01	-0,12	-0,06	-0,07	-0,06	-0,03	-0,05	0,00	0,00	-0,07	-0,05	-0,13
85	0,01	0,05	-0,07	-0,01	-0,02	-0,01	0,01	0,00	0,05	0,05	-0,02	0,01	-0,09
90	0,06	0,10	-0,02	0,04	0,03	0,03	0,06	0,05	0,10	0,09	0,03	0,05	-0,04
95	0,10	0,15	0,03	0,08	0,08	0,08	0,11	0,10	0,15	0,14	0,08	0,10	0,01
100	0,15	0,20	0,08	0,13	0,12	0,13	0,16	0,15	0,19	0,19	0,13	0,15	0,06

F.3. Conchillas

La Tabla 8 muestra una elevada variabilidad entre los miembros del ensamble, con valores que oscilan entre 65 y 95. Asimismo, se observa una mayor dispersión para el tercer día de pronóstico.

Tabla 8: Sesgo mensual en la estación Conchillas para el período evaluado y los tres horizontes de pronóstico considerados. El ensamble con el menor sesgo mensual se indica en verde oscuro, mientras que los ensambles con valores de sesgo próximos a este se muestran en verde claro.

Ens.	2024			2025									
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.
Primer día de pronóstico													
70	-0,13	-0,12	-0,18	-0,16	-0,14	-0,14	-0,11	-0,11	-0,05	-0,05	-0,10	-0,13	-0,22
75	-0,08	-0,07	-0,13	-0,11	-0,09	-0,09	-0,06	-0,06	-0,01	-0,01	-0,05	-0,08	-0,18
80	-0,04	-0,02	-0,08	-0,07	-0,04	-0,04	-0,02	-0,02	0,04	0,03	0,00	-0,03	-0,13
85	0,01	0,02	-0,04	-0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,08	0,07	0,05	0,01	-0,09
90	0,05	0,07	0,01	0,03	0,05	0,06	0,08	0,08	0,13	0,11	0,09	0,05	-0,04
95	0,10	0,11	0,05	0,08	0,10	0,10	0,12	0,12	0,17	0,16	0,14	0,10	0,01
100	0,14	0,16	0,10	0,12	0,15	0,15	0,17	0,17	0,22	0,20	0,19	0,15	0,05
Segundo día de pronóstico													
70	-0,14	-0,11	-0,19	-0,16	-0,13	-0,13	-0,11	-0,11	-0,05	-0,05	-0,11	-0,12	-0,24
75	-0,10	-0,06	-0,14	-0,11	-0,08	-0,09	-0,06	-0,06	-0,01	-0,01	-0,06	-0,08	-0,19
80	-0,05	-0,02	-0,09	-0,07	-0,04	-0,04	-0,01	-0,02	0,03	0,04	-0,01	-0,04	-0,14
85	-0,01	0,03	-0,05	-0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,08	0,08	0,04	0,01	-0,09
90	0,04	0,08	0,00	0,03	0,06	0,05	0,08	0,08	0,13	0,12	0,09	0,05	-0,05
95	0,08	0,12	0,05	0,08	0,10	0,10	0,13	0,12	0,17	0,16	0,13	0,10	0,00
100	0,13	0,17	0,09	0,12	0,15	0,15	0,18	0,17	0,22	0,20	0,18	0,14	0,05
Tercer día de pronóstico													
65	-0,22	-0,19	-0,28	-0,21	-0,21	-0,22	-0,17	-0,19	-0,12	-0,05	-0,16	-0,20	-0,28
70	-0,17	-0,14	-0,23	-0,16	-0,16	-0,17	-0,12	-0,14	-0,08	0,00	-0,11	-0,15	-0,23
75	-0,12	-0,09	-0,19	-0,12	-0,11	-0,12	-0,08	-0,10	-0,03	0,04	-0,07	-0,10	-0,19
80	-0,08	-0,04	-0,14	-0,07	-0,06	-0,07	-0,03	-0,05	0,01	0,08	-0,02	-0,05	-0,14
85	-0,03	0,00	-0,09	-0,02	-0,02	-0,02	0,02	0,00	0,06	0,12	0,03	-0,01	-0,09
90	0,01	0,05	-0,05	0,03	0,03	0,02	0,07	0,05	0,10	0,16	0,07	0,04	-0,05
95	0,06	0,09	0,00	0,07	0,08	0,07	0,11	0,09	0,15	0,20	0,12	0,09	0,00
100	0,10	0,14	0,05	0,12	0,12	0,12	0,16	0,14	0,19	0,24	0,17	0,13	0,05

F.4. Nueva Palmira

La Tabla 9 indica que esta estación es la que presenta mayor variabilidad en el ensamble óptimo de todas las estaciones del canal, con ensambles óptimos que varían entre 40 y 85.

Tabla 9: Sesgo mensual en la estación Nueva Palmira para el período evaluado y los tres horizontes de pronóstico considerados. El ensamble con el menor sesgo mensual se indica en verde oscuro, mientras que los ensambles con valores de sesgo próximos a este se muestran en verde claro.

Ens.	2024			2025									
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.
Primer día de pronóstico													
40	-0,18	-0,18	-0,22	-0,20	-0,25	-0,31	-0,28	-0,26	-0,03	-0,07	-0,15	-0,11	-0,18
45	-0,15	-0,14	-0,19	-0,17	-0,22	-0,27	-0,24	-0,22	-0,01	-0,05	-0,12	-0,09	-0,15
50	-0,12	-0,11	-0,16	-0,13	-0,18	-0,24	-0,21	-0,19	0,01	-0,02	-0,09	-0,06	-0,13
55	-0,09	-0,08	-0,13	-0,10	-0,15	-0,20	-0,17	-0,16	0,04	0,00	-0,06	-0,03	-0,11
60	-0,06	-0,04	-0,10	-0,07	-0,12	-0,16	-0,13	-0,12	0,06	0,02	-0,03	0,00	-0,08
65	-0,02	-0,01	-0,07	-0,03	-0,08	-0,13	-0,09	-0,09	0,09	0,05	0,00	0,02	-0,05
70	0,01	0,03	-0,04	0,00	-0,04	-0,09	-0,06	-0,05	0,11	0,07	0,03	0,05	-0,02
75	0,04	0,06	0,00	0,03	-0,01	-0,05	-0,02	-0,02	0,14	0,10	0,06	0,08	0,00
80	0,07	0,10	0,03	0,07	0,03	-0,01	0,02	0,02	0,17	0,13	0,10	0,11	0,03
85	0,11	0,14	0,06	0,10	0,07	0,03	0,06	0,05	0,20	0,15	0,13	0,14	0,06
Segundo día de pronóstico													
40	-0,18	-0,17	-0,23	-0,20	-0,25	-0,31	-0,28	-0,22	-0,03	-0,07	-0,15	-0,11	-0,18
45	-0,16	-0,14	-0,20	-0,17	-0,22	-0,27	-0,24	-0,18	-0,01	-0,05	-0,12	-0,08	-0,15
50	-0,13	-0,11	-0,17	-0,13	-0,18	-0,24	-0,21	-0,15	0,02	-0,03	-0,09	-0,06	-0,13
55	-0,09	-0,07	-0,14	-0,10	-0,15	-0,20	-0,17	-0,12	0,04	0,00	-0,06	-0,03	-0,11
60	-0,06	-0,04	-0,11	-0,07	-0,11	-0,16	-0,13	-0,08	0,06	0,02	-0,03	0,00	-0,08
65	-0,03	0,00	-0,08	-0,03	-0,08	-0,12	-0,09	-0,05	0,09	0,05	0,00	0,03	-0,05
70	0,00	0,03	-0,04	0,00	-0,04	-0,09	-0,05	-0,02	0,12	0,07	0,03	0,06	-0,02
75	0,03	0,07	-0,01	0,03	0,00	-0,05	-0,02	0,02	0,14	0,10	0,06	0,09	0,01
80	0,07	0,10	0,02	0,07	0,03	-0,01	0,02	0,06	0,17	0,12	0,10	0,11	0,04
85	0,10	0,14	0,06	0,11	0,07	0,03	0,06	0,09	0,20	0,15	0,13	0,14	0,07
Tercer día de pronóstico													
45	-0,16	-0,16	-0,21	-0,17	-0,22	-0,27	-0,25	-0,19	-0,02	-0,05	-0,14	-0,09	-0,15
50	-0,13	-0,12	-0,19	-0,14	-0,19	-0,23	-0,21	-0,15	0,00	-0,02	-0,11	-0,06	-0,12
55	-0,10	-0,09	-0,16	-0,10	-0,16	-0,20	-0,17	-0,12	0,02	0,00	-0,08	-0,03	-0,10
60	-0,07	-0,06	-0,13	-0,07	-0,12	-0,16	-0,14	-0,09	0,05	0,02	-0,05	-0,01	-0,07
65	-0,04	-0,02	-0,09	-0,04	-0,09	-0,12	-0,10	-0,06	0,07	0,05	-0,02	0,02	-0,04
70	-0,01	0,01	-0,06	0,00	-0,05	-0,09	-0,06	-0,03	0,10	0,07	0,02	0,05	-0,01
75	0,02	0,05	-0,03	0,03	-0,02	-0,05	-0,02	0,01	0,13	0,10	0,05	0,08	0,02
80	0,06	0,08	0,00	0,07	0,02	-0,01	0,01	0,04	0,16	0,12	0,08	0,11	0,05
85	0,09	0,12	0,03	0,10	0,06	0,03	0,05	0,08	0,18	0,15	0,12	0,14	0,08

G. Análisis de ventanas de evaluación

Se evaluó el desempeño de distintas ventanas temporales (1, 3, 7, 10, 15, 20 y 30 días).

Los resultados muestran que la ventana de 1 día presenta alta variabilidad, mientras que ventanas largas reducen la dispersión pero pierden capacidad de adaptación.

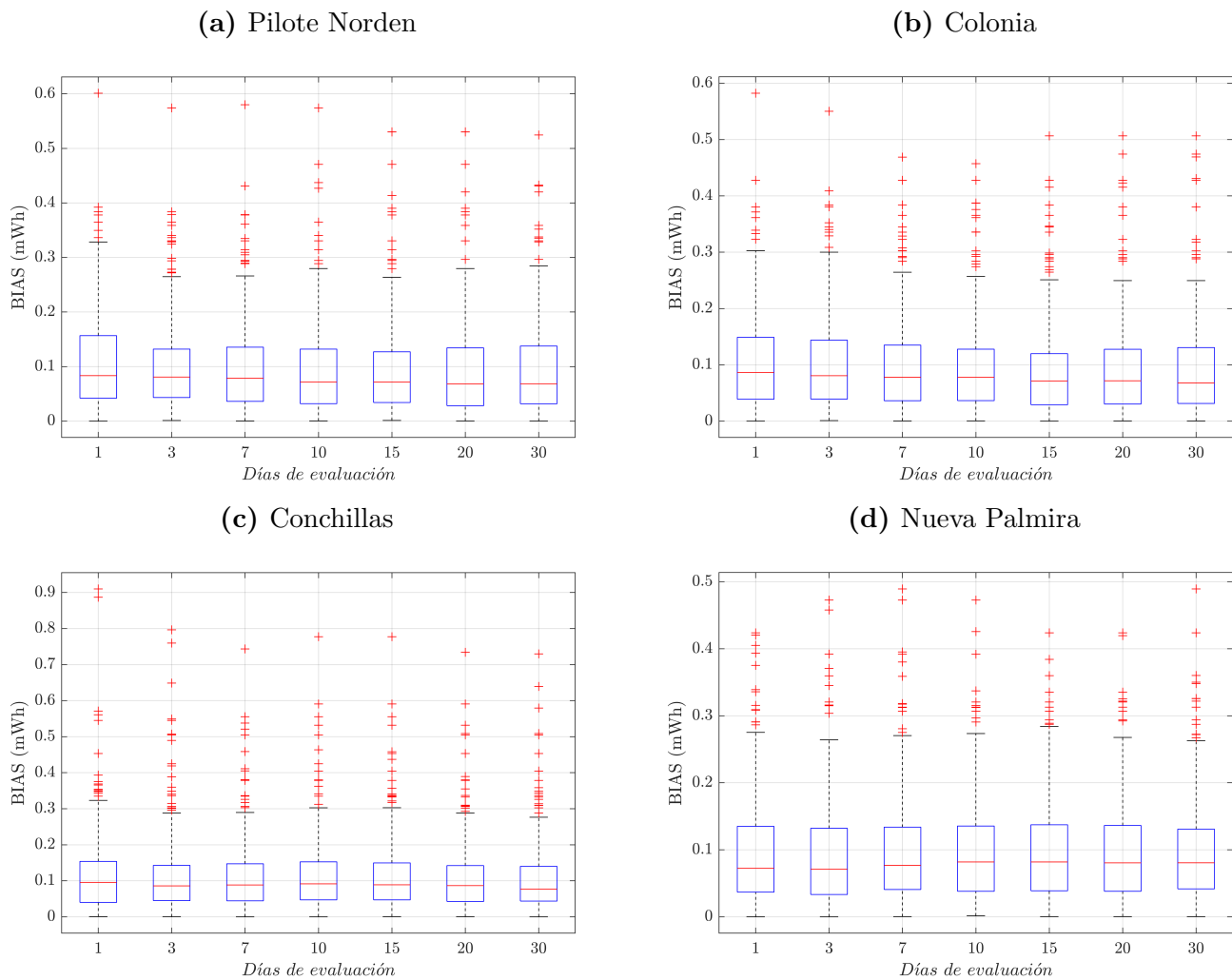


Figura 19: Boxplots que muestran la dispersión del bias diario para cada serie generada, considerando diferentes ventanas de días evaluados (3, 7, 10, 15, 20 y 30) durante el período analizado.

Tabla 10: Comparación de las series generadas a partir de distintos días de evaluación en todas las estaciones. Se muestran las veces en que cada serie obtuvo un BIAS menor respecto a las demás.

Días de evaluación	2024			2025										Tot.
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	
Pilote Norden														
1	9	9	9	5	8	11	7	5	5	5	10	6	7	96
3	6	3	3	3	3	2	3	4	3	10	2	4	4	50
7	3	5	7	5	2	2	4	6	3	3	5	11	8	64
10	0	4	6	3	1	3	4	6	0	2	7	7	2	45
15	1	3	6	1	1	5	2	2	1	2	1	0	7	32
20	0	3	0	4	10	0	6	3	8	0	3	2	1	40
30	12	3	0	0	2	4	4	2	7	8	3	0	2	47
Colonia														
1	4	1	6	2	5	9	9	7	6	10	10	6	11	86
3	8	2	4	3	6	6	3	4	5	8	2	6	4	61
7	3	2	4	2	4	1	7	10	3	6	10	10	7	69
10	3	2	2	4	2	2	2	5	3	3	5	3	0	36
15	1	1	8	2	8	3	6	0	0	1	0	0	6	36
20	0	0	0	0	1	1	1	1	11	0	4	4	3	26
30	0	0	0	0	0	5	2	1	1	3	0	1	0	13
Conchillas														
1	14	8	10	6	8	10	12	9	6	2	5	6	10	106
3	6	4	3	7	8	6	3	4	9	3	5	8	2	68
7	6	6	6	4	1	1	5	5	3	1	5	6	3	52
10	2	2	6	0	3	1	2	4	1	1	3	1	2	28
15	0	4	3	3	3	4	5	4	1	3	2	4	4	40
20	1	4	3	2	4	4	2	1	0	2	4	1	6	34
30	2	2	0	0	0	1	1	1	9	1	3	4	4	28
Nueva Palmira														
1	9	7	6	1	9	7	3	3	10	11	8	8	8	90
3	7	2	6	5	8	8	4	2	3	4	3	7	5	64
7	8	3	6	4	1	3	2	1	4	6	6	2	5	51
10	2	2	1	1	3	2	2	2	2	3	1	0	4	25
15	1	6	2	0	1	3	7	3	0	1	1	4	3	32
20	2	3	0	0	0	0	0	0	4	1	7	6	4	27
30	2	3	2	7	4	3	0	0	6	4	4	3	2	40

H. Comparación de ventanas intermedias

Se compararon las ventanas de 3, 7 y 10 días, observándose que:

- 3 días: mayor frecuencia de mejora, pero mayor variabilidad.

- 7 días: mejor estabilidad.
- 10 días: comportamiento intermedio.

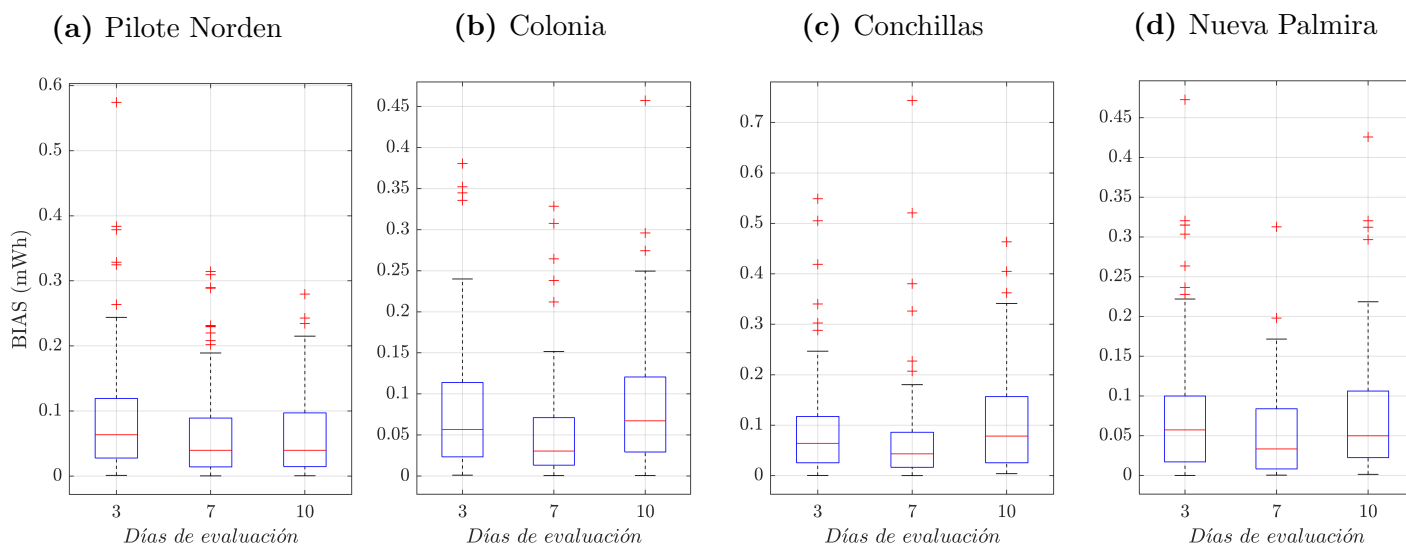


Figura 20: Dispersión del bias diario para cada serie generada (3, 7 y 10 días).

Tabla 11: Frecuencia en la que cada serie generada presentó un BIAS menor, considerando distintas ventanas de evaluación, para el pronóstico a tres días.

Días de evaluación	2024			2025										Tot.
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	
Pilote Norden														
3	17	14	15	8	17	18	13	10	11	16	13	10	12	174
7	12	5	8	6	9	2	9	9	10	6	7	12	13	108
10	2	11	8	7	1	7	8	9	6	8	11	8	6	92
Colonia														
3	11	3	13	7	12	21	10	10	17	14	9	12	13	152
7	4	2	4	2	8	3	10	12	3	12	14	14	13	101
10	4	3	7	4	6	3	10	6	9	5	8	4	5	74
Conchillas														
3	18	16	18	14	17	20	13	12	19	7	12	20	11	197
7	8	9	6	5	4	4	11	8	6	5	10	8	7	91
10	5	5	7	3	6	3	6	8	4	1	5	2	12	67
Nueva Palmira														
3	15	12	12	10	17	15	13	4	9	18	11	21	16	173
7	11	9	8	5	4	6	2	2	4	7	11	3	5	77
10	5	5	3	3	5	5	3	5	16	5	8	6	10	79

I. Evaluación de resultados

I.1. Selección del ensamble

En esta sección se presenta la evolución temporal del ensamble seleccionado diariamente para cada estación durante el período de evaluación. Cada punto corresponde al miembro del ensamble elegido en función del criterio de mínimo sesgo en la ventana de evaluación definida.

Estas figuras permiten analizar la estabilidad del proceso de selección y la variabilidad del ensamble en función de la dinámica local de cada estación.

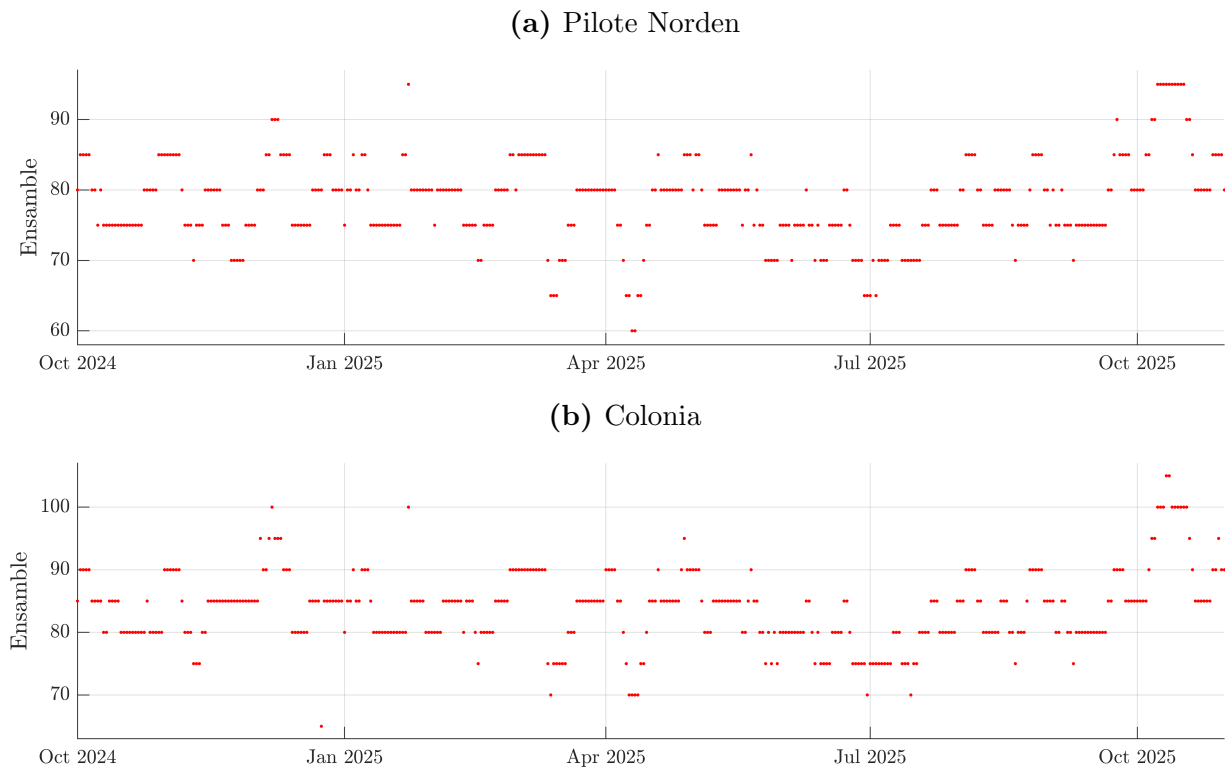


Figura 21: Evolución temporal del ensamble seleccionado.

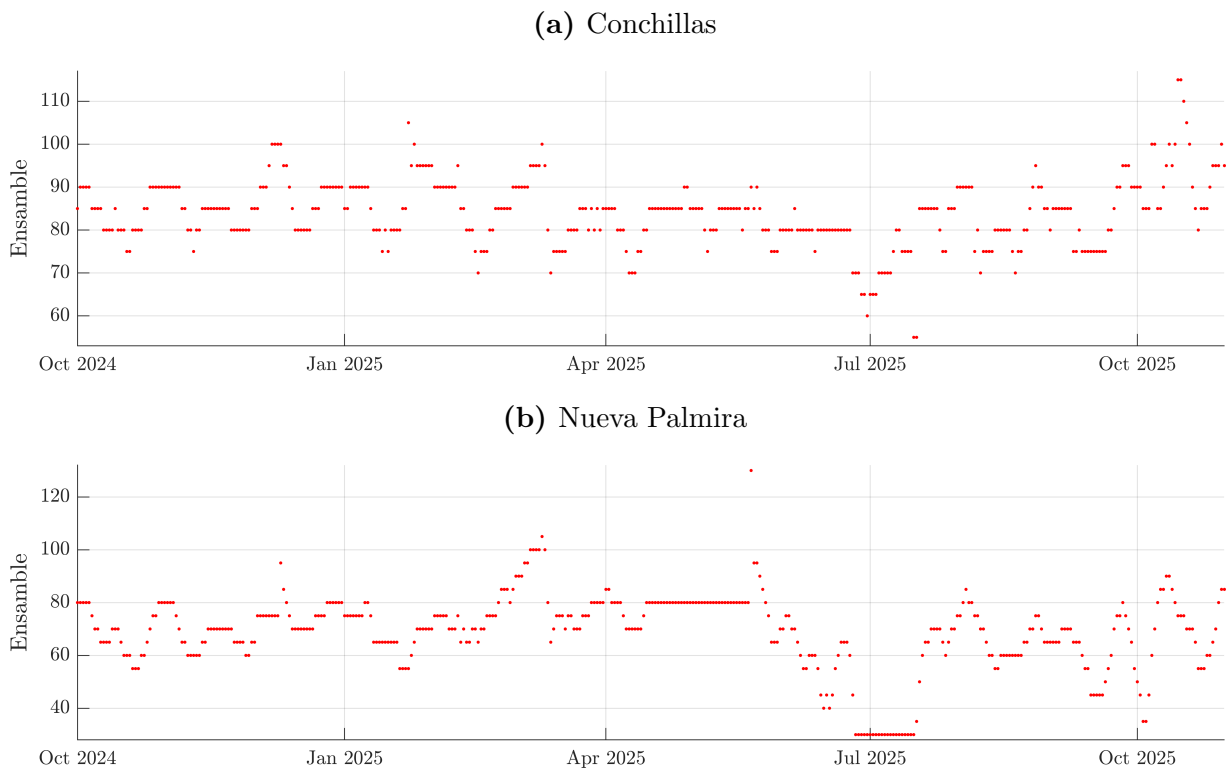


Figura 22: Evolución temporal del ensamble seleccionado.

I.2. Métricas de desempeño en régimen medio

Se presentan los valores mensuales del sesgo absoluto ($|BIAS|$) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para cada estación, calculados a partir de la serie compuesta.

Estos resultados permiten evaluar la variabilidad temporal del error y complementar el análisis resumido presentado en el cuerpo del informe.

Tabla 12: Bias absoluto ($|BIAS|$) y RMSE mensuales del nivel para el período octubre 2024 – octubre 2025.

	2024			2025										Tot.
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	
Pilote Norden														
BIAS	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
RMSE	0,12	0,14	0,15	0,13	0,14	0,13	0,16	0,17	0,18	0,13	0,16	0,15	0,16	0,15
Colonia														
BIAS	0,02	0,04	0,00	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,00	0,01
RMSE	0,11	0,10	0,16	0,12	0,13	0,11	0,13	0,15	0,17	0,13	0,16	0,15	0,15	0,14
Conchillas														
BIAS	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00
RMSE	0,15	0,17	0,20	0,16	0,21	0,17	0,17	0,19	0,20	0,18	0,20	0,20	0,37	0,21
Nueva Palmira														
BIAS	0,00	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,04	0,00
RMSE	0,09	0,11	0,09	0,09	0,13	0,13	0,09	0,28	0,16	0,13	0,09	0,13	0,16	0,13

I.3. Evaluación de eventos extremos

I.3.1. Metodología

Tabla 13: Esquema de la tabla de contingencia utilizada para la evaluación de eventos extremos.

		Observado	
		Sí	No
Pronosticado	Sí	a	b
	No	c	d

En este esquema, a representa los eventos extremos correctamente pronosticados (aciertos), b los eventos pronosticados que no se materializan (falsas alarmas), c los eventos observados que no fueron anticipados por el sistema (fallas) y d los casos en los que no se observa ni se pronostica un evento extremo. El término d no interviene en el cálculo de los estadísticos de verificación empleados en este estudio.

A partir de la tabla de contingencia, se calcularon distintos estadísticos de verificación. En particular, se emplearon el *hit rate* (HR), el *false alarm rate* (FAR) y el *threat score* (TS), definidos como:

$$HR = \frac{a}{a + c} \times 100 \tag{2}$$

$$FAR = \frac{b}{a + b} \times 100 \tag{3}$$

$$TS = \frac{a}{a + b + c} \tag{4}$$

donde HR representa la proporción de eventos extremos observados que fueron correctamente pronosticados, FAR indica la proporción de eventos pronosticados que no se verificaron, y TS constituye una medida integrada del desempeño del sistema al considerar simultáneamente aciertos, falsas alarmas y fallas.

I.3.2. Eventos extremos máximos

Tabla 14: Tablas de contingencia correspondientes a los eventos extremos máximos observados y pronosticados en las estaciones de Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira.

		Pilote Norden				Colonia	
		Observado				Observado	
		Sí	No			Sí	No
Pronosticado	Sí	13	7	Pronosticado	Sí	9	2
	No	1			No	1	
		Conchillas				Nueva Palmira	
		Observado				Observado	
		Sí	No			Sí	No
Pronosticado	Sí	11	13	Pronosticado	Sí	12	8
	No	0			No	2	

I.3.3. Eventos extremos mínimos

Tabla 15: Tablas de contingencia correspondientes a los eventos extremos mínimos observados y pronosticados en las estaciones de Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira.

		Pilote Norden				Colonia	
		Observado				Observado	
		Sí	No			Sí	No
Pronosticado	Sí	14	25	Pronosticado	Sí	7	8
	No	2			No	0	

		Conchillas				Nueva Palmira	
		Observado				Observado	
		Sí	No			Sí	No
Pronosticado	Sí	7	36	Pronosticado	Sí	3	0
	No	0			No	7	

J. Evaluación detallada con forzante WRF

J.1. Variabilidad del ensamble elegido

Las figuras 23 y 24 muestran la evolución temporal del ensamble seleccionado diariamente en cada estación durante el período de evaluación.

En términos generales, se observan comportamientos diferenciados según la localización. Pilote Norden presenta una selección relativamente estable, concentrada en un rango acotado de miembros del ensamble, lo que indica una respuesta consistente del sistema.

En contraste, Colonia y Conchillas exhiben una mayor variabilidad, con alternancias frecuentes entre miembros de distinto orden, evidenciando una mayor sensibilidad a cambios en las condiciones del sistema. En particular, Conchillas presenta la mayor dispersión en la selección.

Por su parte, Nueva Palmira muestra fluctuaciones marcadas, incluyendo períodos con predominio de miembros bajos seguidos de una recuperación hacia valores intermedios y altos, lo que refleja cambios significativos en la dinámica local.

En conjunto, los resultados evidencian que la selección del ensamble no es constante en el tiempo y presenta distintos grados de variabilidad según la estación, lo que justifica la necesidad de una metodología adaptativa.

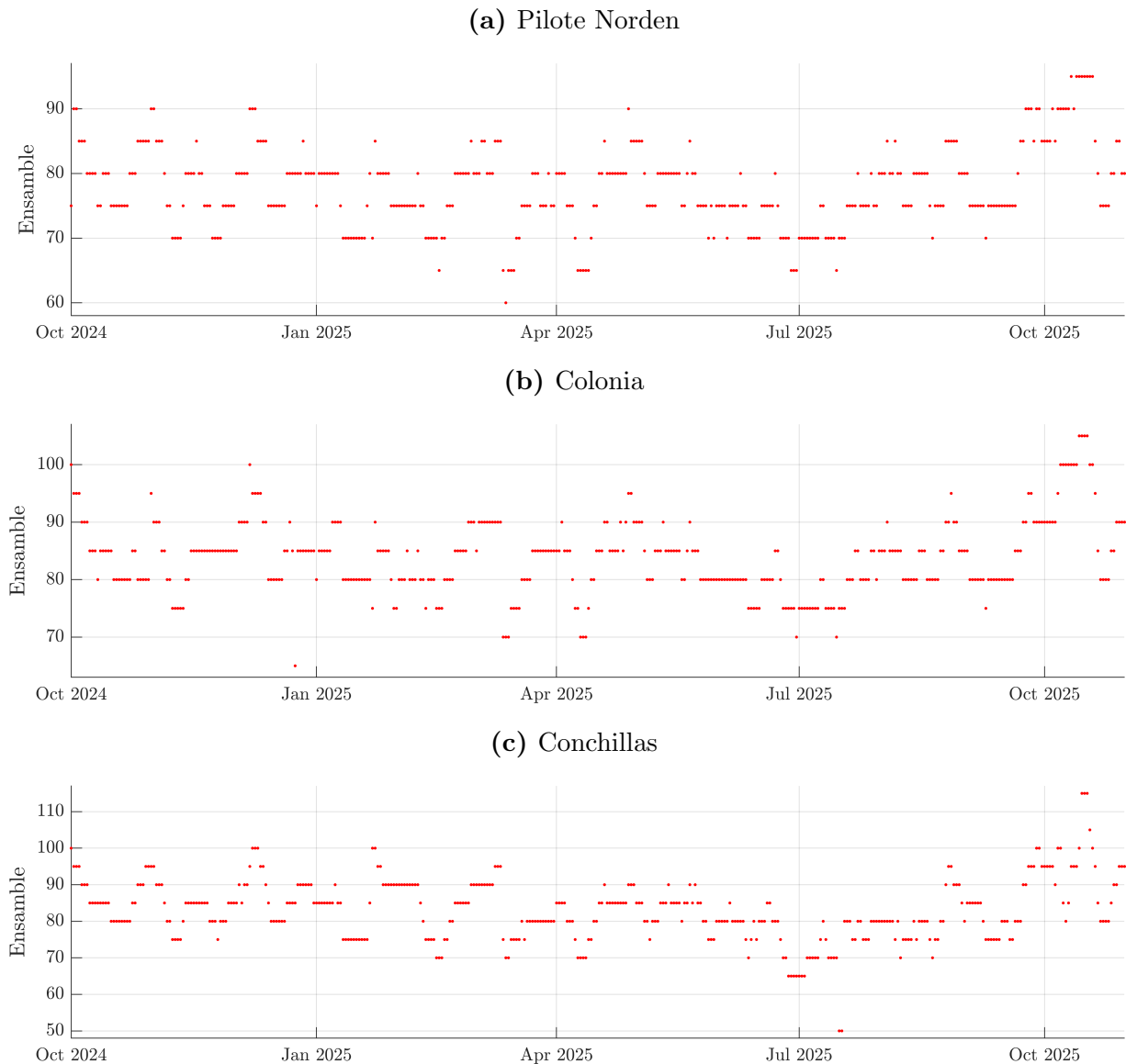


Figura 23: Evolución temporal del ensamble elegido diariamente para cada estación: (a) Pilote Norden, (b) Colonia y (c) Conchillas, durante el período de evaluación. Cada punto representa el ensamble seleccionado en cada día.

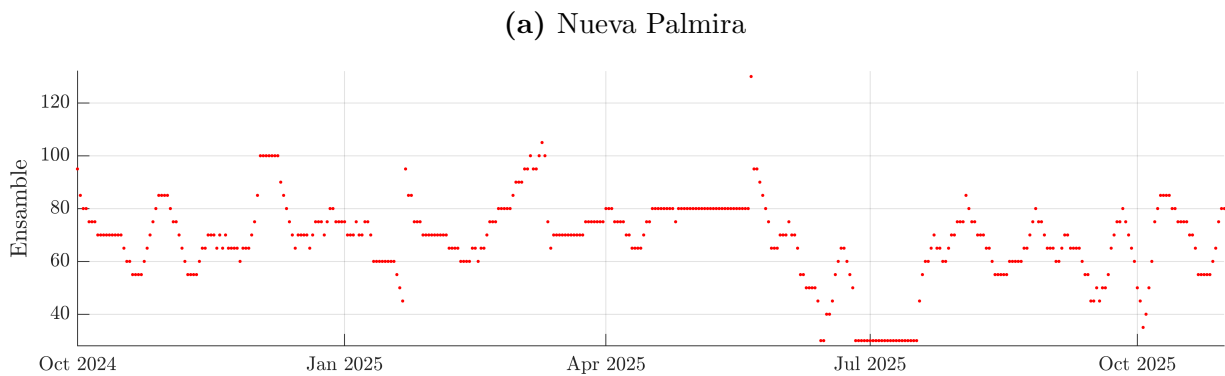


Figura 24: Evolución temporal del ensamble elegido diariamente para la estación (a) Nueva Palmira, durante el período de evaluación. Cada punto representa el ensamble seleccionado en cada día.

J.2. Régimen medio

La Tabla 16 presenta los valores mensuales de $|\text{BIAS}|$ y RMSE del nivel para las estaciones del Canal durante el período octubre 2024 – octubre 2025.

En todas las estaciones, los valores de $|\text{BIAS}|$ se mantienen cercanos a cero, indicando ausencia de sesgo sistemático significativo en la estimación del nivel medio.

En Pilote Norden, el $|\text{BIAS}|$ varía entre 0,00 y 0,03, mientras que el RMSE se mantiene en el rango 0,11–0,18, con un leve aumento hacia el final del período. El RMSE total es 0,15.

En Colonia, el $|\text{BIAS}|$ es generalmente bajo, con un máximo puntual en noviembre (0,07). El RMSE oscila entre 0,11 y 0,17, con un incremento en octubre de 2025 (0,20). El RMSE total es 0,14.

En Conchillas, el $|\text{BIAS}|$ se mantiene bajo, con un valor máximo de 0,05 en julio. El RMSE varía entre 0,14 y 0,19, con un incremento significativo en octubre de 2025 (0,32), lo que resulta en el mayor RMSE total (0,19) entre las estaciones.

En Nueva Palmira, el $|\text{BIAS}|$ se encuentra en el rango 0,00–0,04. El RMSE se mantiene entre 0,10 y 0,16, con un máximo en mayo (0,27). El RMSE total es 0,13, el menor del conjunto.

En términos generales, las diferencias entre estaciones se reflejan principalmente en la magnitud del RMSE, mientras que el sesgo permanece bajo en todos los casos.

Tabla 16: Bias absoluto ($|\text{BIAS}|$) y RMSE mensuales del nivel calculados a partir de la serie compuesta, para estaciones del Canal durante el período octubre 2024 – octubre 2025.

	2024			2025										Tot.
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	
Pilote Norden														
BIAS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,00
RMSE	0,13	0,15	0,16	0,11	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,13	0,15	0,17	0,18	0,15
Colonia														
BIAS	0,02	0,07	0,02	0,03	0,02	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00
RMSE	0,13	0,17	0,15	0,12	0,13	0,11	0,13	0,14	0,15	0,13	0,14	0,16	0,20	0,14
Conchillas														
BIAS	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01	0,03	0,00
RMSE	0,15	0,18	0,17	0,14	0,19	0,17	0,16	0,18	0,19	0,17	0,19	0,19	0,32	0,19
Nueva Palmira														
BIAS	0,00	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,01	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00
RMSE	0,11	0,13	0,10	0,10	0,13	0,14	0,10	0,27	0,15	0,14	0,10	0,13	0,16	0,13

J.3. Régimen extremal

J.3.1. Metodología

La evaluación de eventos extremos se realizó mediante el uso de tablas de contingencia y el cálculo de estadísticos de verificación. La definición de la metodología, así como de los indicadores empleados (HR, FAR y TS), se presenta en la Sección I.3.1.

J.3.2. Resultados

Las Tablas 18 y 19 presentan las tablas de contingencia y los estadísticos de verificación asociados a la detección de eventos extremos en las estaciones del Canal.

Para los eventos extremos máximos, los valores de HR son elevados en todas las estaciones (86 %–100 %), indicando una alta capacidad de detección. Colonia presenta el mejor desempeño global (TS = 0.75, HR = 90 %, FAR = 18 %). Pilote Norden muestra un comportamiento robusto (TS = 0.62, HR = 93 %), con un FAR mayor (35 %).

En Conchillas, el HR alcanza el 100 %, pero el FAR es elevado (54 %), resultando en TS = 0.46. En Nueva Palmira, el desempeño es aceptable (TS = 0.55, HR = 86 %), con FAR = 40 %.

Para los eventos extremos mínimos, el desempeño es más heterogéneo. En Pilote Norden, se obtiene $HR = 88\%$ y $FAR = 64\%$ ($TS = 0.34$), indicando sobreestimación. En Colonia, el HR es 100% con $FAR = 53\%$ ($TS = 0.47$).

En Conchillas, el HR es 100% pero el FAR alcanza 84% , resultando en el menor TS (0.16), evidenciando una marcada sobrepredicción. En Nueva Palmira, no se registran falsas alarmas ($FAR = 0\%$), pero el HR es bajo (30%), indicando subdetección ($TS = 0.3$).

En términos generales, el sistema presenta mejor desempeño en la detección de eventos máximos que mínimos. Para los mínimos, predomina la sobreestimación en la mayoría de las estaciones, mientras que en Nueva Palmira se observa el comportamiento opuesto.

Tabla 17: Tablas de contingencia correspondientes a los eventos extremos máximos observados y pronosticados en las estaciones de Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira.

		Pilote Norden				Colonia	
		Observado				Observado	
		Sí	No			Sí	No
Pronosticado	Sí	15	5	Pronosticado	Sí	14	3
	No	1			No	1	
		Conchillas				Nueva Palmira	
		Observado				Observado	
		Sí	No			Sí	No
Pronosticado	Sí	13	16	Pronosticado	Sí	11	6
	No	1			No	3	

Tabla 18: Tablas de contingencia correspondientes a los eventos extremos mínimos observados y pronosticados en las estaciones de Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira.

Pilote Norden				Colonia			
Pronosticado		Observado		Pronosticado		Observado	
		Sí	No			Sí	No
		Sí	14			26	Sí
No	2		No	0			

Conchillas				Nueva Palmira			
Pronosticado		Observado		Pronosticado		Observado	
		Sí	No			Sí	No
		Sí	10			44	Sí
No	0		No	7			

Tabla 19: Estadísticos de verificación (TS, HR y FAR) para eventos extremos máximos y mínimos del sistema de pronóstico de niveles en las estaciones analizadas.

Estación	Eventos máximos			Eventos mínimos		
	TS	HR (%)	FAR (%)	TS	HR (%)	FAR (%)
Pilote Norden	0.71	93.8	25	0.33	87.5	65
Colonia	0.78	93.3	17.6	0.48	100	52.4
Conchillas	0.43	92.9	55.2	0.19	100	81.5
Nueva Palmira	0.55	78.6	35.3	0.3	30	0

K. Tablas de contingencia: serie compuesta y ensamble 90

Tabla 20: Tablas de contingencia de los eventos extremos máximos observados y pronosticados en Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira, utilizadas para la comparación entre la serie compuesta y el ensamble 90.

Ensamble 90			SC NOAA			SC WRF		
Pilote Norden								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	14	12		13	7		13	6
No	0		No	1		No	1	
Colonia								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	8	3		9	2		8	2
No	0		No	1		No	2	
Conchillas								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	10	13		11	13		11	0
No	0		No	0		No	0	
Nueva Palmira								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	14	19		12	8		12	5
No	0		No	2		No	2	

Tabla 21: Tablas de contingencia de los eventos extremos mínimos observados y pronosticados en Pilote Norden, Colonia, Conchillas y Nueva Palmira, utilizadas para la comparación entre la serie compuesta y el ensamble 90.

Ensamble 90			SC NOAA			SC WRF		
Pilote Norden								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	14	6		14	25		12	15
No	2		No	2		No	4	
Colonia								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	7	4		7	8		7	8
No	0		No	0		No	0	
Conchillas								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	8	23		7	36		7	31
No	0		No	0		No	0	
Nueva Palmira								
Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado		Pronosticado	Observado	
	Sí	No		Sí	No		Sí	No
	0	0		3	0		2	0
No	10		No	7		No	8	