



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA

**Modelo hidrodinámico del río Paraná para
pronóstico hidrológico: evaluación de performance,
actualización y extensión de su aplicación.**

EVALUACIÓN DE PERFORMANCE DEL MODELO



*Proyecto Interno 336
Informe LHA 02-336-14
Ezeiza, Diciembre de 2014*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

**DIRECTORA DE LA DIRECCIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y ALERTA
HIDROLÓGICO**

Dr. Dora. GONIADZKI

DIRECTORES DEL PROYECTO

Ing. Mariano RE - Ing. Pablo E. GARCIA

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Mariano RE

Ing. Pablo E. GARCIA

Ing. Juan BORUS

Ing. Juan GIACOSA

Lic. Leandro GIORDANO

Ing. Gastón LATESSA

Srta. Alicia PUCHETA

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Pablo E. GARCIA

Ing. Mariano RE

Ing. Gastón LATESSA

MODELO HIDRODINÁMICO DEL RÍO PARANÁ PARA PRONÓSTICO HIDROLÓGICO: EVALUACIÓN DE PERFORMANCE, ACTUALIZACIÓN Y EXTENSIÓN DE SU APLICACIÓN.

Evaluación de performance del modelo

RESUMEN

Se realizaron las simulaciones del período Septiembre de 1994 - Diciembre de 2010 con el modelo actualmente en operación y el modelo actualizado. Las series simuladas resultantes fueron comparadas con los datos observados, cuantificando la calidad de ajuste mediante una serie de indicadores estadísticos.

Descriptores temáticos: Modelación, Hidrodinámica, Pronóstico Hidrológico.

Descriptores geográficos: Río Paraná, Argentina, Paraguay.

ÍNDICE

EVALUACIÓN DE PERFORMANCE DEL MODELO	I
1 INTRODUCCIÓN	4
2 MODELOS	5
2.1 Modelos y estaciones de control	5
2.2 Resultados de la modelación	7
3 EVALUACIÓN DE PERFORMANCE	14
3.1 Análisis de performance	14
3.2 Indicadores de performance	14
3.2.1 Error Mínimo (MINE)	14
3.2.2 Error Máximo (MAXE)	15
3.2.3 Error Medio (EM)	15
3.2.4 Error Medio Absoluto (MAE)	15
3.2.5 Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):	15
3.2.6 Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSEI)	16
3.3 Períodos temporales	16
3.4 Performance	17
3.4.1 Serie 1	17
3.4.2 Serie 2	21
3.4.3 Serie 3	25
3.4.4 Serie 4	29
3.5 Evaluación gráfica	33
3.5.1 Gráficos de dispersión	33
3.5.2 Superficies de frecuencia de error	42

4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	48
4.1	Variables sensibles	48
4.2	Coeficiente de rugosidad n de Manning	48
4.3	Nivel de albardones	50
4.4	Evolución de sección transversal en la Isla Guáscara	51
5	CONCLUSIONES	62

1 INTRODUCCIÓN

La Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico (SlyAH) del Instituto Nacional del Agua (INA), tiene como uno de sus objetivos principales el de comunicar, con la mayor antelación posible, la ocurrencia de crecidas y bajantes pronunciadas en la Cuenca del Plata a distintos organismos competentes del orden nacional y provincial, estableciéndose así como un eslabón de suma importancia en la cadena de alerta hidrológica de la región.

Una de las principales herramientas de este sistema es la simulación numérica. Para esto se cuenta con un modelo hidrodinámico unidimensional del Sistema Paraná / Paraguay que se utiliza para pronóstico hidrológico, propagando la onda de crecida proveniente de la alta cuenca del Paraná, que es donde se origina la mayor parte del caudal debido a las precipitaciones. Este modelo se basa en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant 1D, implementada en el software EZEIZA V desarrollado por el Programa de Hidráulica Computacional (PHC) del Laboratorio de Hidráulica (LHA) del INA (Pujol y Dolinkue, 1974; Menéndez et al., 1987; Menéndez, 1996). El tramo del río Paraná simulado con el modelo actual, se extiende desde el embalse de Yacyretá (Ituzaingó, Corrientes) hasta la ciudad de Villa Constitución (Santa Fe), mientras que el tramo del río Paraguay va desde Puerto Pilcomayo (Formosa) hasta su confluencia con el Paraná (Jaime y Menéndez, 1997; Jaime et al., 2000). En el Informe anterior de este Proyecto (García et al., 2012b) se presentaron las características generales del modelo en operación y se propuso, además de una serie de ajustes, una adecuación geométrica del mismo.

En general, la performance del modelo operativo, para las simulaciones del período 1994-2010, ha resultado satisfactoria tanto en lo que respecta a la representación de niveles como a la de caudales. A pesar de ello, se observan diferencias entre los resultados de las simulaciones respecto de las observaciones. En este informe se presentan los resultados de las simulaciones con el nuevo modelo (según lo propuesto en García et al., 2012b), comparándolas con los del modelo operativo y las variables observadas. Para cuantificar las diferencias entre las simulaciones y las observaciones se eligieron una serie de indicadores estadísticos, siendo aplicados utilizando las series de niveles observados y simulados. Las series elegidas para evaluar performance corresponden a estaciones sobre el río Paraná (tramo que sufrió modificaciones si se comparan el modelo operativo y la nueva versión). También se propone una evaluación gráfica para analizar el comportamiento del nuevo modelo propuesto.

2 MODELOS

2.1 Modelos y estaciones de control

Los resultados de las dos simulaciones del río Paraná, con los modelos M00 y M01, fueron sometidos a un análisis de performance. A continuación se resumen las modificaciones introducidas (más detalles de las mismas se pueden encontrar en García et al., 2012b):

- Modificación del eje del modelo
- Reubicación de secciones transversales y escalas hidrométricas
- Redefinición de curvas de parámetros de las secciones
- Redefinición de anchos de la planicie de inundación
- Adecuación de condiciones de borde y condiciones iniciales
- Modificación del cero del hidrómetro de Esquina

Las series elegidas para la evaluación corresponden a estaciones sobre el río Paraná donde se encuentran distintas escalas hidrométricas. La Tabla 2.1 muestra la progresiva de dichas estaciones, con su correspondiente codificación.

Tabla 2.1. Estaciones de control: códigos y sus progresivas.

Orden	Escala	Códigos	Progresiva [Km]
1	ITA-IBATE	ITAE	70.06
2	ITATI	ITAT	168.05
3	CORRIENTES	CORR	236.18
4	EMPEDRADO	EMPE	296.15
5	BELLA VISTA	BVIS	377.92
6	GOYA	GOYA	454.82
7	RECONQUISTA	RECO	483.89
8	ESQUINA	ESQU	580.77
9	LA PAZ	LAPA	664.55
10	HERNANDARIAS	HERN	729.97
11	PARANA	PARA	809.37
12	SANTA FE	SAFE	817.51
13	DIAMANTE	DIAM	866.79
14	SAN MARTÍN	SMAR	953.26
15	ROSARIO	ROSA	984.17

En la Figura 2.1 se puede ver la ubicación de las 15 estaciones de control:

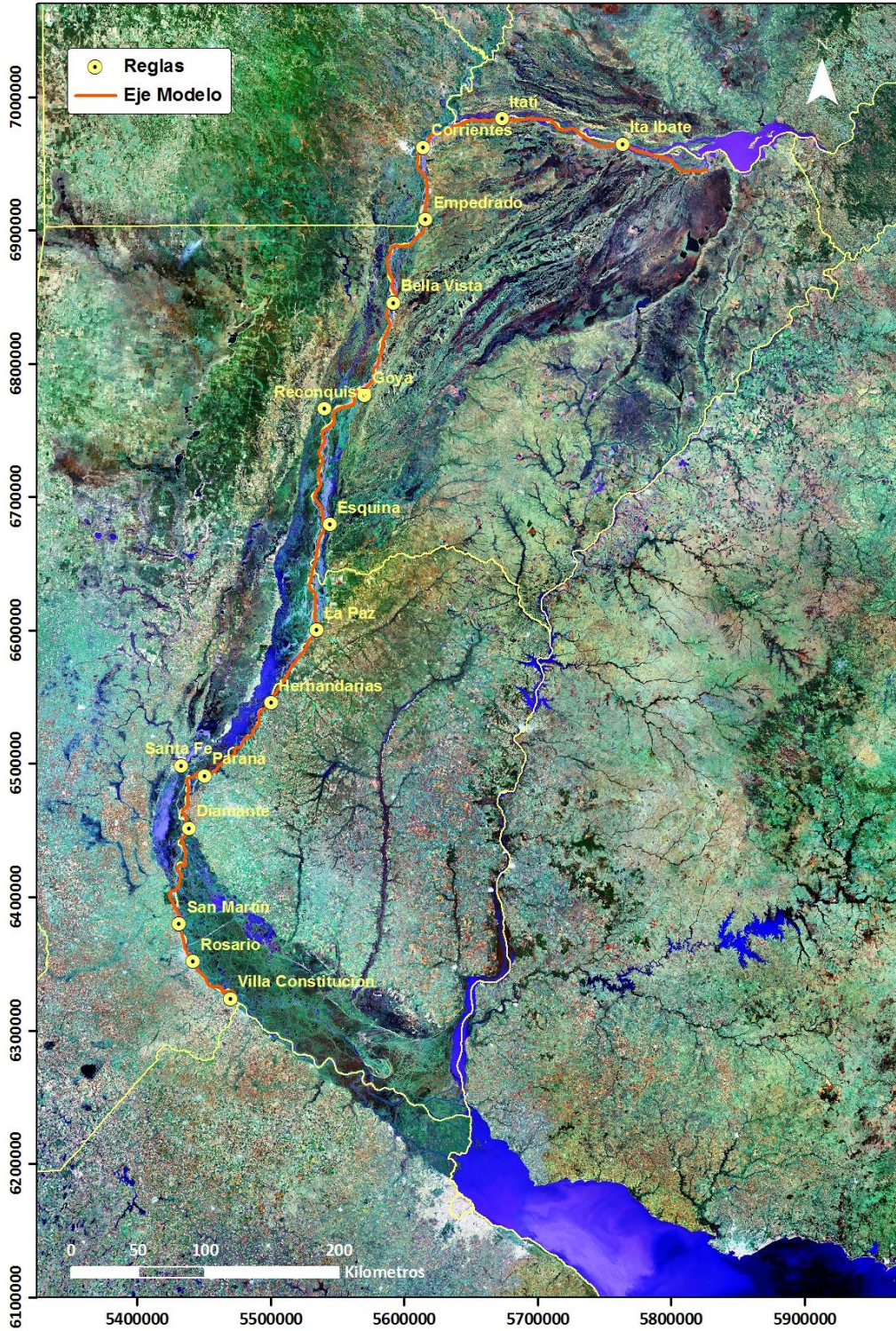
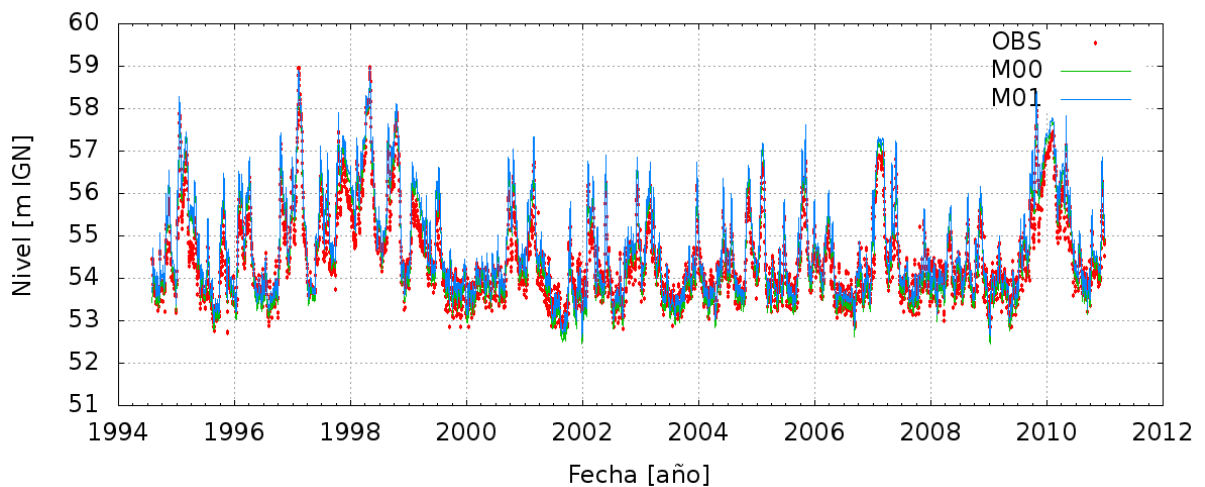


Figura 2.1. Estaciones de control.

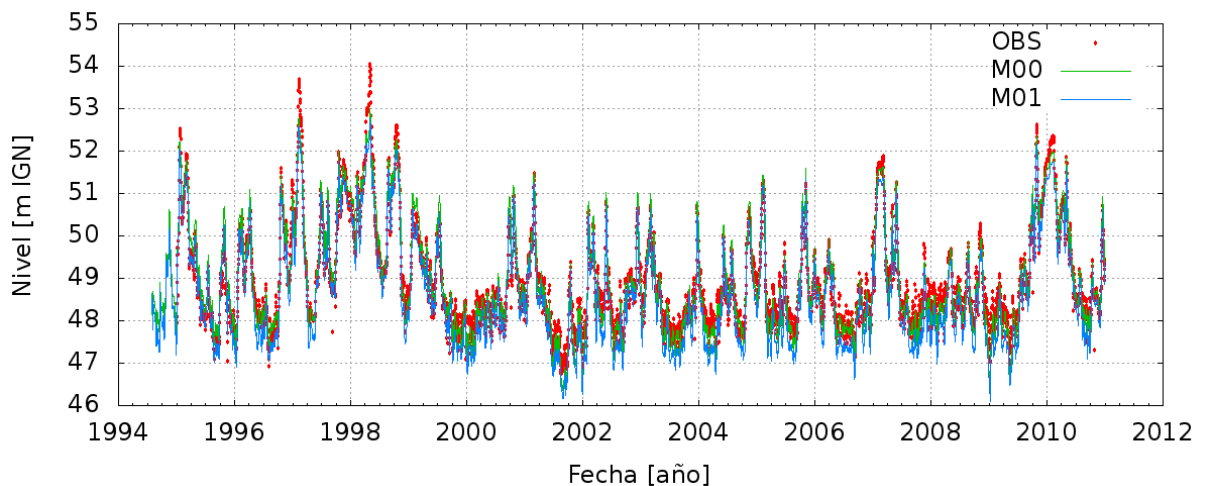
2.2 Resultados de la modelación

El análisis del comportamiento de los dos modelos fue efectuado en base a la comparación de niveles registrados y simulados. Se presentan a continuación los resultados de las simulaciones con los modelos M00 y M01 (modelo operativo actual y modelo modificado, respectivamente) para las quince estaciones de control seleccionadas (Figura 2.2).

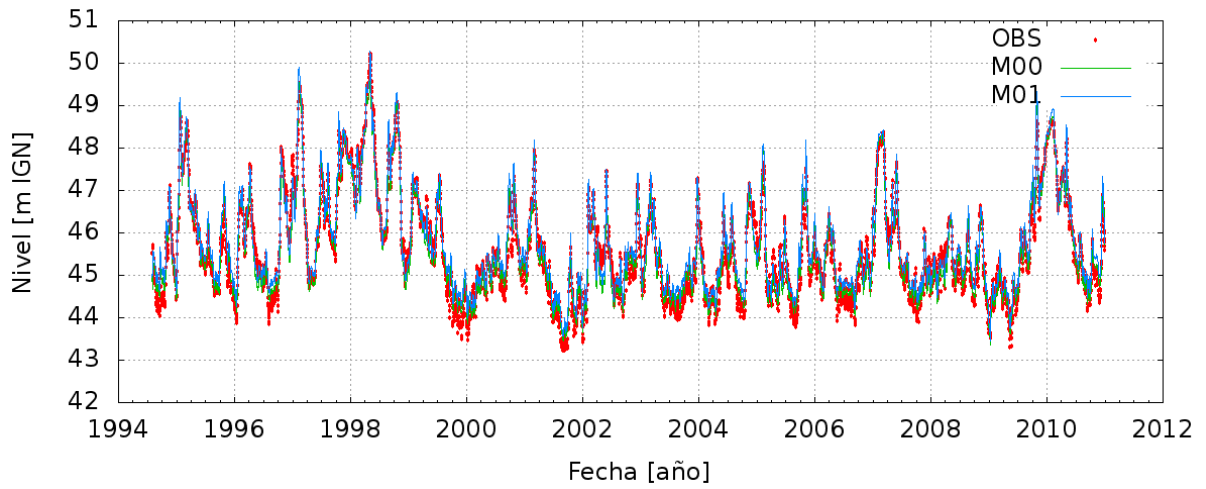
Las simulaciones se realizaron para el período Septiembre 1994 – Diciembre 2010. En este período de simulación se destaca la presencia de la crecida extraordinaria de 1998 y varias crecidas ordinarias (como la del 2010, más reciente de la ventana de tiempo analizada).



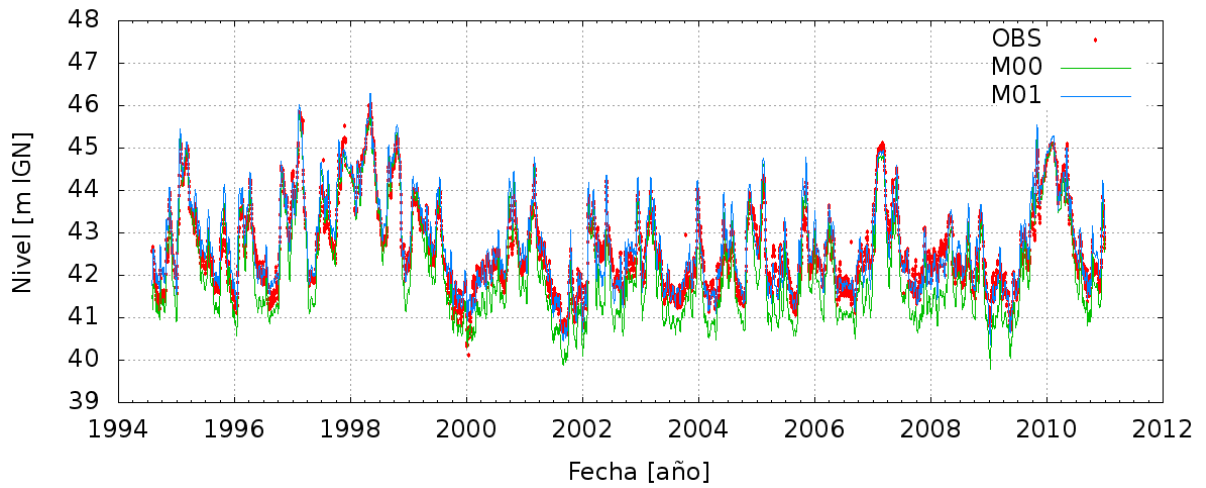
a) Itaibaté



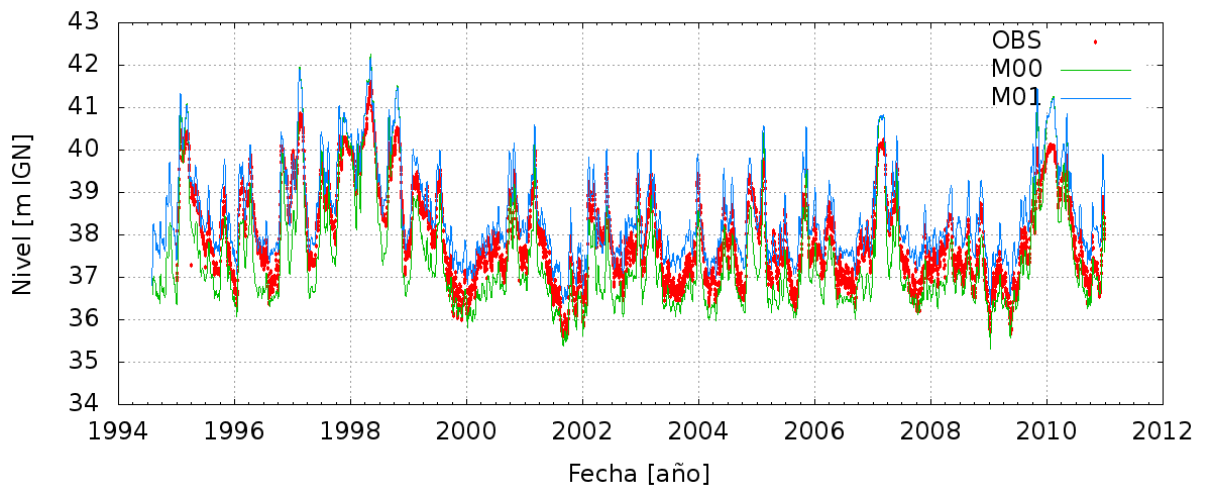
b) Itatí



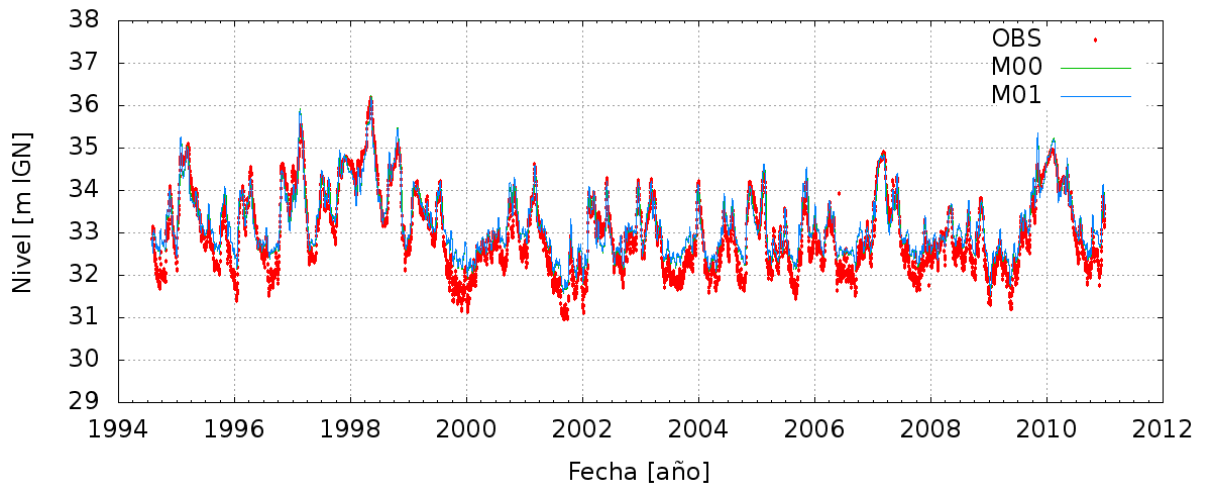
c) Corrientes



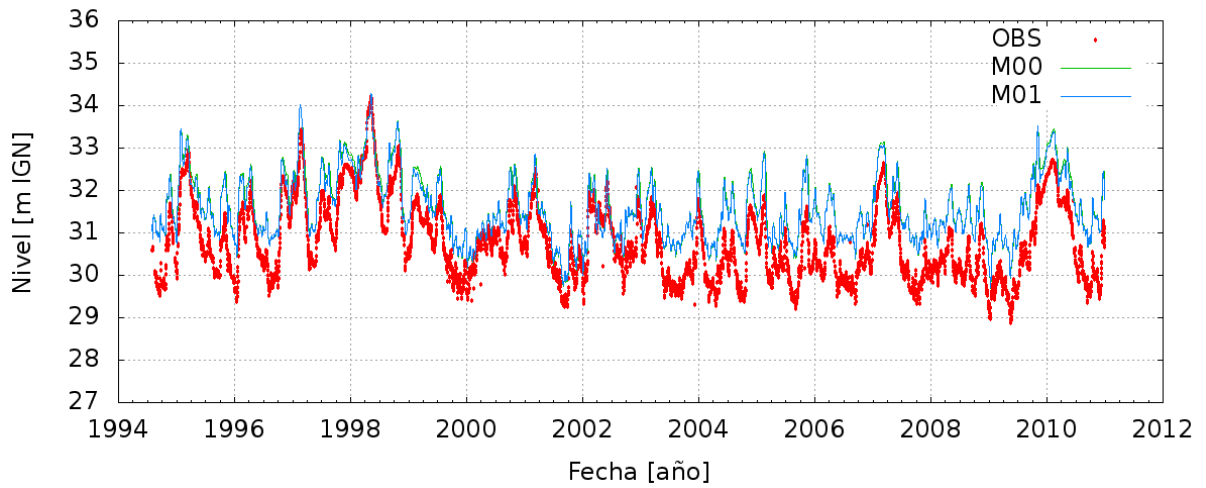
d) Empedrado



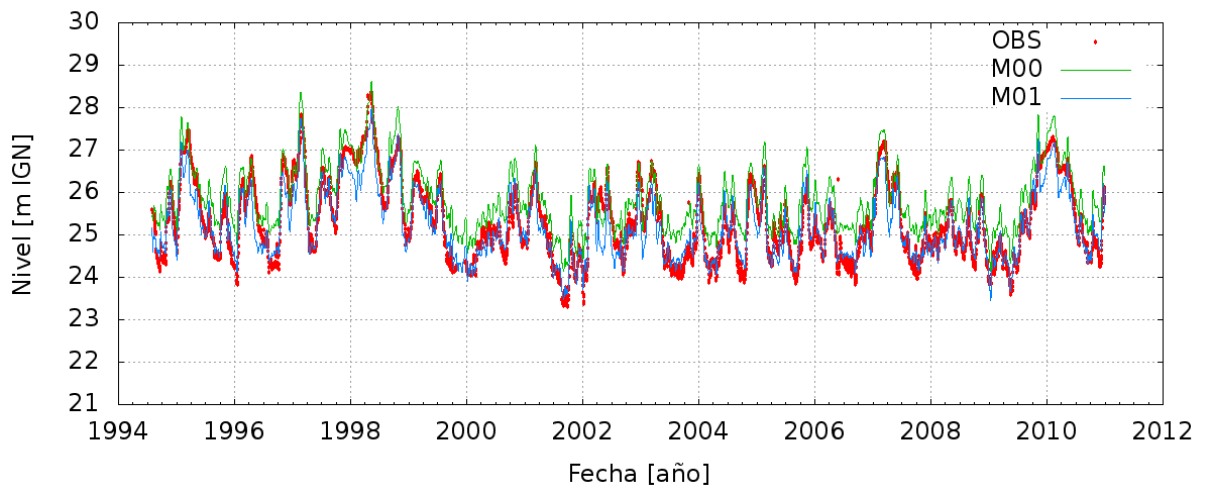
e) Bella Vista



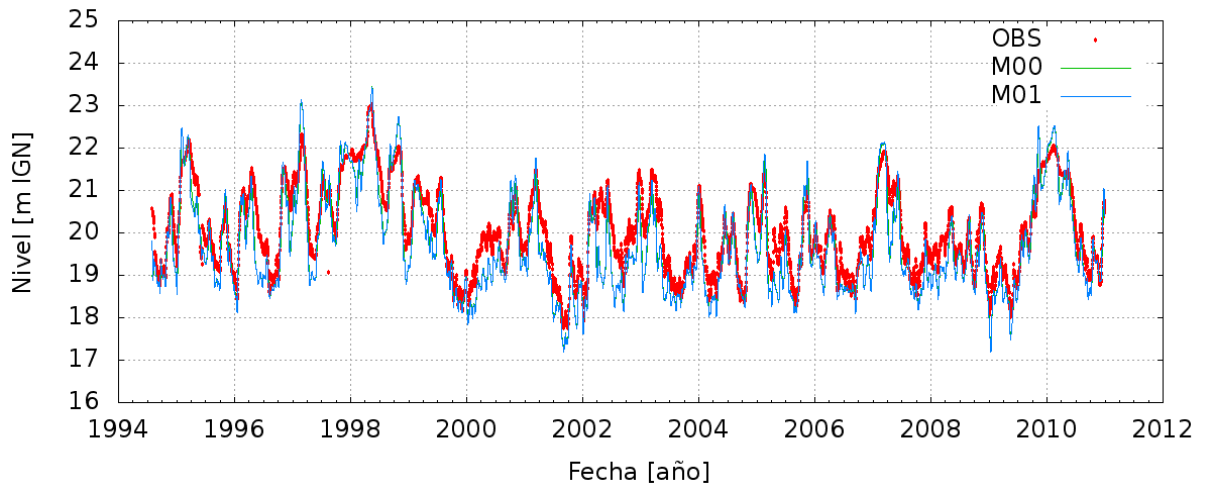
f) Goya



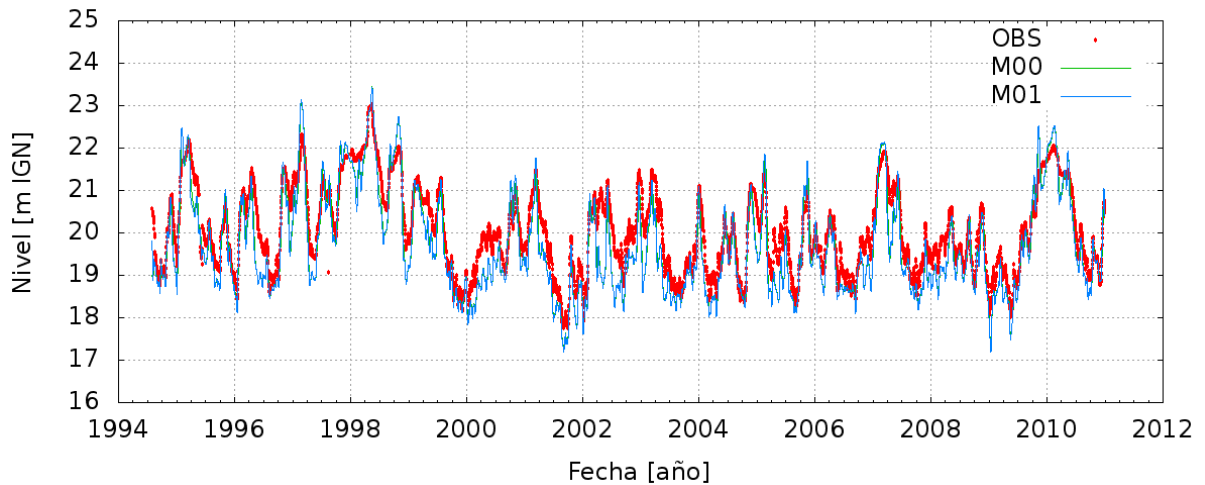
g) Reconquista



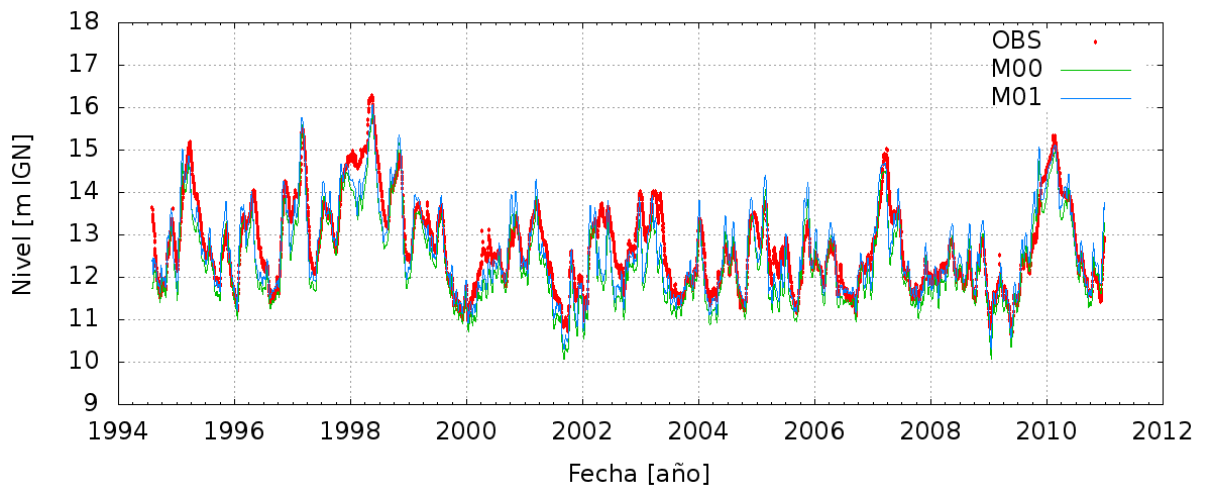
h) Esquina



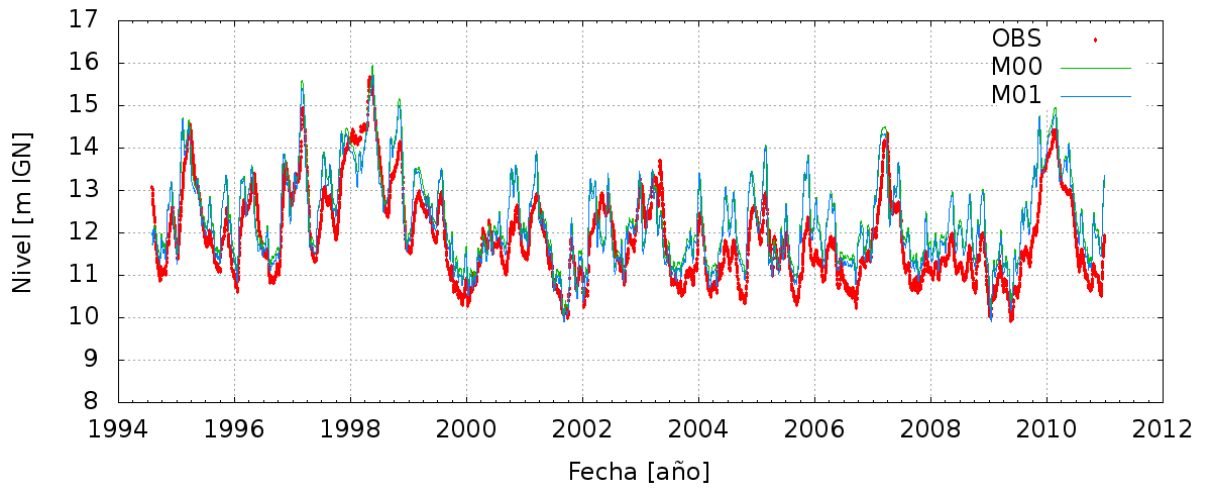
i) La Paz



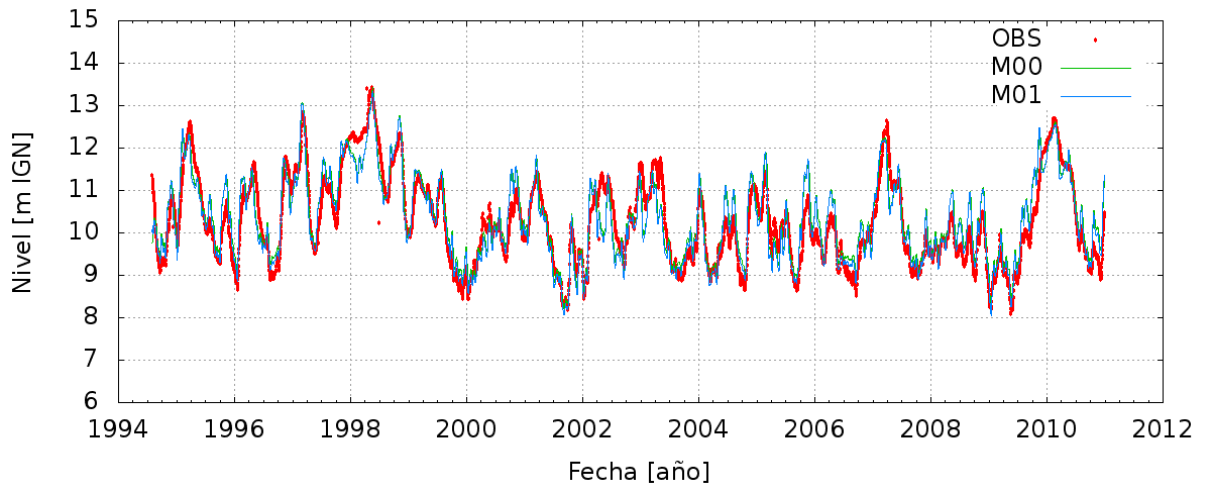
j) Hernandarias



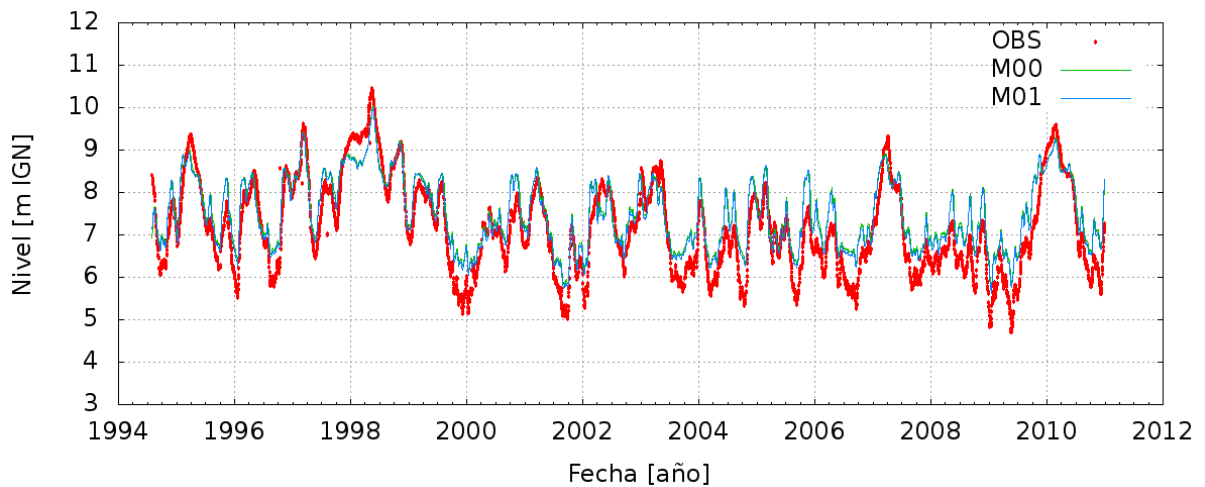
k) Paraná



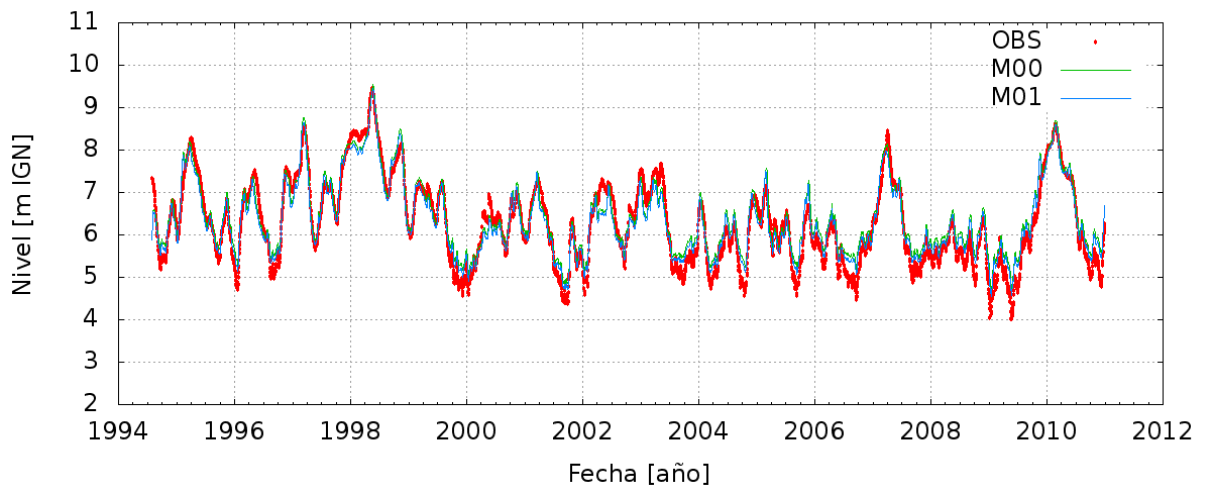
l) Santa Fe



m) Diamante



n) San Martín



ñ) Rosario

Figura 2.2. Series temporales (Observados, Modelo 00 y Modelo 01).

Un primer análisis de la bondad de ajuste entre los niveles simulados y observados del río Paraná se realizó a partir de la comparación de los niveles medios obtenidos para cada estación de control (Figura 2.3). A priori se observa un buen acuerdo general entre estas variables. Dado que el modelo que se está poniendo en valor es utilizado para pronóstico, no solo debe representar correctamente el comportamiento medio del río Paraná, sino que debe ser capaz de resolver correctamente todas las situaciones dinámicas que puedan ocurrir en el mismo. Por lo tanto, en el capítulo siguiente se presente un análisis más exhaustivo acerca de la representación de los niveles en el río Paraná.

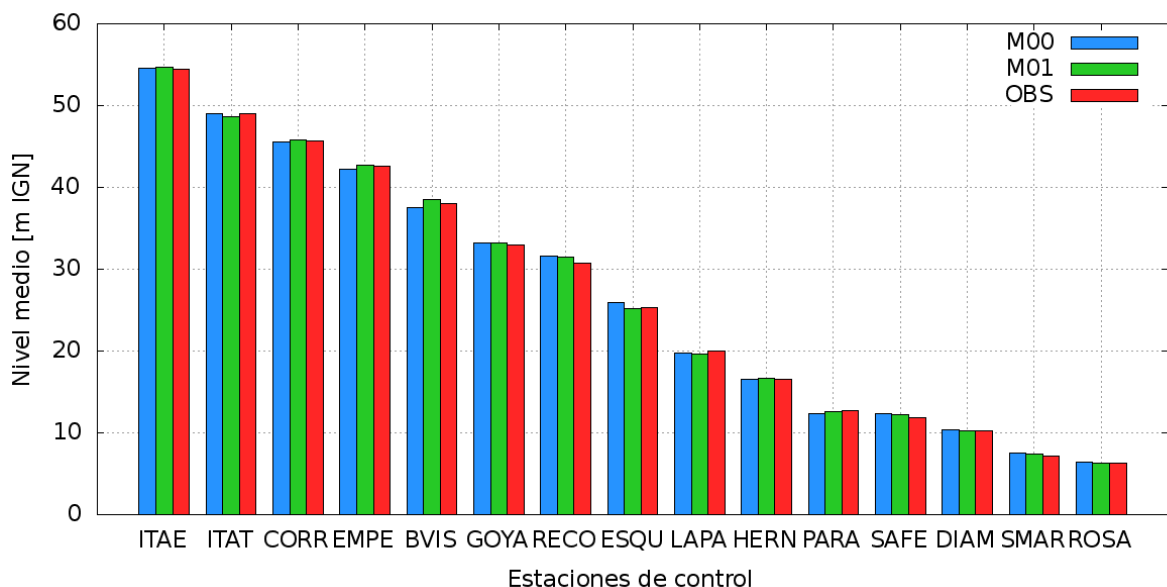


Figura 2.3. Niveles medios (observados y simulados, M00 y M01).

En general, en la mayoría de las estaciones de control, se observan cambios en los valores medios simulados con el modelo M00 y M01. Los niveles medios en las estaciones Goya, Reconquista, La Paz, Hernandarias y San Martín no presentan cambios de una modelación a la otra. Son tres las estaciones de control que muestran cambios significativos en el nivel medio al mejorar el modelo, y estas son Empedrado, Bella Vista y Esquina (modificación del cero de escala).

Los cambios negativos, en sentido contrario que la mejora del modelo, se dan básicamente en las estaciones de aguas arriba del modelo (Itaibaté, Itatí, Corrientes y Bella Vista; con diferencias promedio respecto de lo observado que pasan de aproximadamente 15 cm a 30 cm).

Hacia aguas abajo se observan cambios positivos respecto de los cambios en la modelación. En las estaciones Empedrado, Esquina, Paraná, Santa Fe, Diamante y Rosario se dan reducciones en las diferencias con los niveles medios observados de aproximadamente de 35 cm a 15 cm.

3 EVALUACIÓN DE PERFORMANCE

3.1 Análisis de performance

En general, se emplean dos métodos para determinar la bondad de ajuste de modelos numéricos de problemas hidrológicos o hidráulicos: la evaluación gráfica o visual y la valoración estadística. En este informe, además del primero, se utiliza la aplicación de criterios estadísticos de eficiencia en algunos nodos del modelo (estaciones de control) para evaluar la performance del modelo aplicado: se obtienen indicadores de performance a partir de las diferencias entre los valores simulados y observados de los niveles del río.

La selección y el uso de criterios de eficiencia específicos y la interpretación de los resultados puede ser un desafío incluso para los más experimentados, ya que cada criterio pone un énfasis diferente en el comportamiento de las variables simuladas y observadas (Krause et al., 2005).

En general, muchos criterios de eficiencia contienen una sumatoria del término de error (diferencia entre el valor simulado y el observado en cada intervalo de tiempo), normalizado por una medida de la variabilidad de las observaciones. Para evitar la cancelación de los errores de signo opuesto, en muchos indicadores de eficiencia se utiliza la suma de los errores absolutos o cuadrados (Krause et al., 2005).

Las series temporales disponibles para la aplicación de indicadores de performance corresponden a los niveles medios diarios observados y simulados, en cada estación de seguimiento o control, para distintos períodos en la ventana temporal Septiembre 1994 – Diciembre 2010.

3.2 Indicadores de performance

Para evaluar la performance de la modelación, se eligieron seis indicadores de calidad de ajuste. Estos indicadores se obtuvieron a partir de los niveles observados y simulados en las distintas estaciones de control disponibles.

3.2.1 Error Mínimo (MINE)

Se determina como el error máximo negativo de la serie. Indica la máxima subestimación del modelo por debajo de los datos observados. En este caso, un bajo valor de MINE (negativo) indicaría que el modelo predice un nivel del río mucho menor que el real.

$$MINE = \min\{H_{SIM_i} - H_{OBS_i}\}$$

siendo H_{SIM_i} el valor de nivel simulado de la estación i y H_{OBS_i} el valor de nivel observado de la estación i

3.2.2 Error Máximo (MAXE)

Se determina como el error máximo positivo de la serie. Indica la máxima sobreestimación del modelo por sobre los datos observados. En este caso, un alto valor de MAXE indicaría que el modelo predice un nivel del río mucho mayor que el real.

$$MAXE = \max\{H_{SIM_i} - H_{OBS_i}\}$$

3.2.3 Error Medio (EM)

El error medio (EM) es un parámetro estadístico que mide el promedio de los errores (diferencia entre la simulación y la observación). En este indicador se compensan los errores positivos y negativos (sobre y subestimaciones del modelo respectivamente).

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{SIM_i} - H_{OBS_i}$$

Siendo n el número total de datos.

3.2.4 Error Medio Absoluto (MAE)

El Error Medio Absoluto es una cantidad utilizada para medir qué tan cerca están las predicciones de los valores observados (Ahmed, 2010).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{SIM_i} - H_{OBS_i}|$$

3.2.5 Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):

El RMSE es una medida de uso frecuente de las diferencias entre los valores simulados y los observados. Su rango comienza en 0, siendo éste el caso ideal. Un mayor valor del RMSE se relaciona con un mayor desvío entre los valores simulados y los valores observados (Ahmed, 2010).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{SIM_i} - H_{OBS_i})^2}$$

3.2.6 Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSEI)

Este indicador relaciona la diferencia entre valores observados y simulados con la varianza de los valores simulados (Nash y Sutcliffe, 1970). Los valores que toma este índice están en el rango $[-\infty; 1]$: NSEI igual a 1 representa un ajuste perfecto y un NSEI menor que 0 indica que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictora similar al modelo (Krause et al., 2005; Shrestha y Nestmann, 2009; Ahmed, 2010; Nóbrega et al., 2011; García et al., 2012a).

$$NSEI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - H_{SIM_i})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - \overline{H_{OBS}})^2}$$

3.3 Períodos temporales

La serie de niveles observados y simulados comprende el período Septiembre de 1994 – Diciembre de 2010. A lo largo de todo este período, el río ha presentado diversos escenarios hidrológicos, siendo algunos de ellos analizados separadamente con el objetivo de evaluar el comportamiento del modelo en circunstancias particulares. Por lo tanto se plantearon cuatro series temporales de análisis, detallados en la Tabla 3.1. En la Figura 3.1 se muestra la serie de niveles en Rosario señalándose cada uno de estos períodos especificados.

Tabla 3.1. Series temporales de análisis.

#	Período	Característica
1	01/Sep/1994 - 31/Dic/2010	Serie completa
2	01/Oct/1999 - 01/Mar/2000	Período de aguas bajas
3	01/Feb/2007 - 01/Abr/2007	Crecida importante, con un avance de onda brusco
4	01/Ene/2009 - 31/Dic/2009	Año: bajante en primer semestre y crecida en segundo

La *Serie 1* permite analizar la performance del modelo durante un período lo suficientemente largo como para ser representativo de condiciones medias del río. Las características particulares de las *Series 2, 3 y 4* se detallan en la Tabla 3.1.

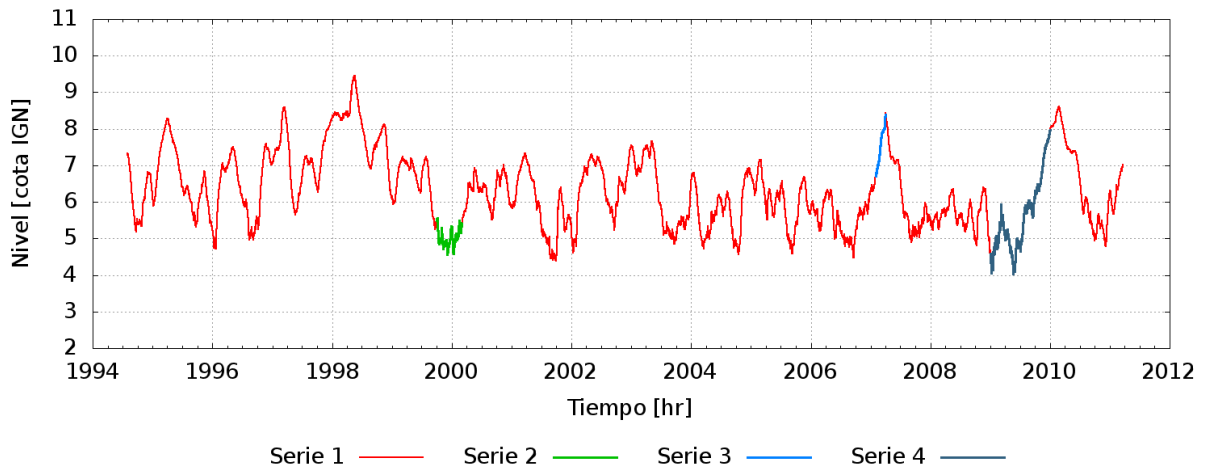


Figura 3.1. Series temporales (niveles observados en Rosario).

3.4 Performance

3.4.1 Serie 1

Las Figuras 3.2 a 3.7 muestran para cada una de las estaciones, los valores del error mínimo (MINE), del error máximo (MAXE), del error medio (EM), del error medio absoluto (MAE), de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y del Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSEI), respectivamente. La Tabla 3.2 resume los valores de las figuras anteriormente mencionadas.

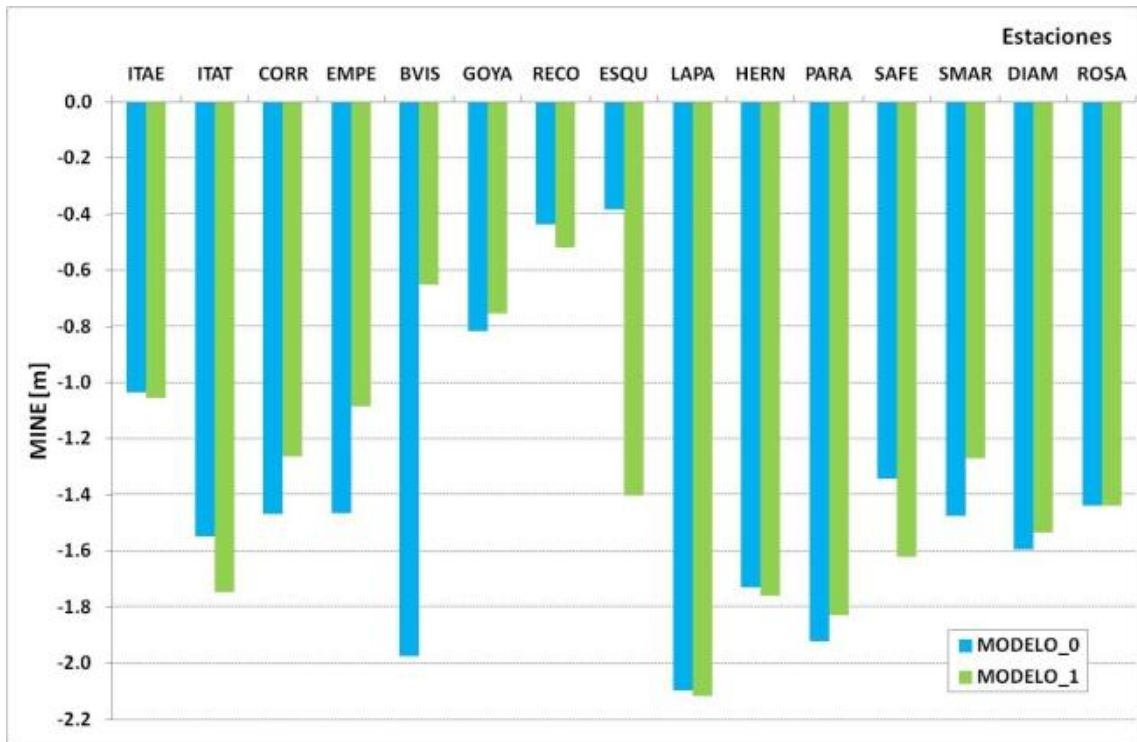


Figura 3.2. Error Mínimo (MINE) para la Serie 1.

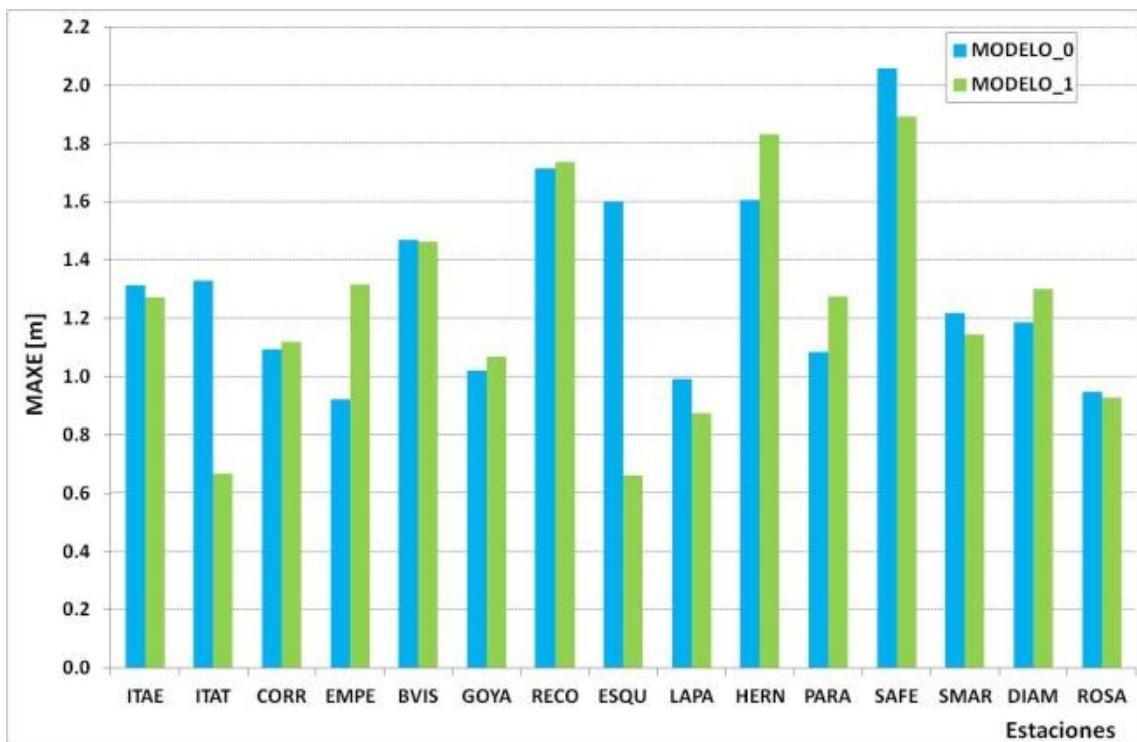


Figura 3.3. Error Máximo (MAXE) para la Serie 1.

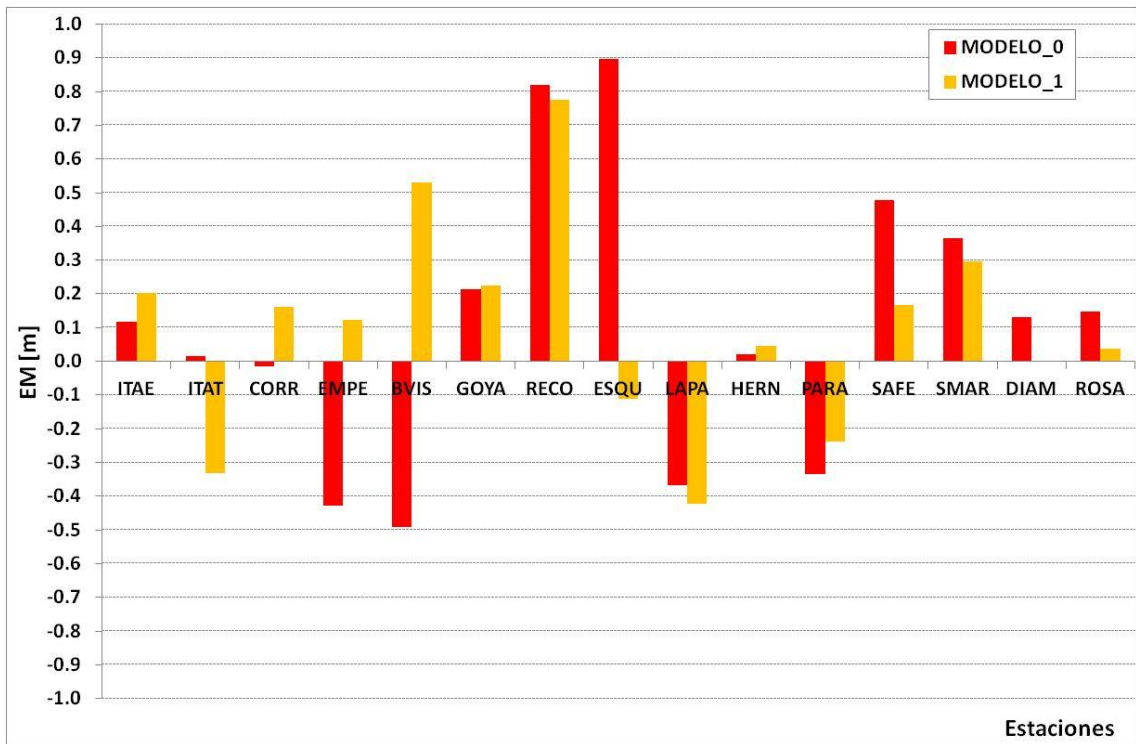


Figura 3.4. Error Medio (EM) para la Serie 1.

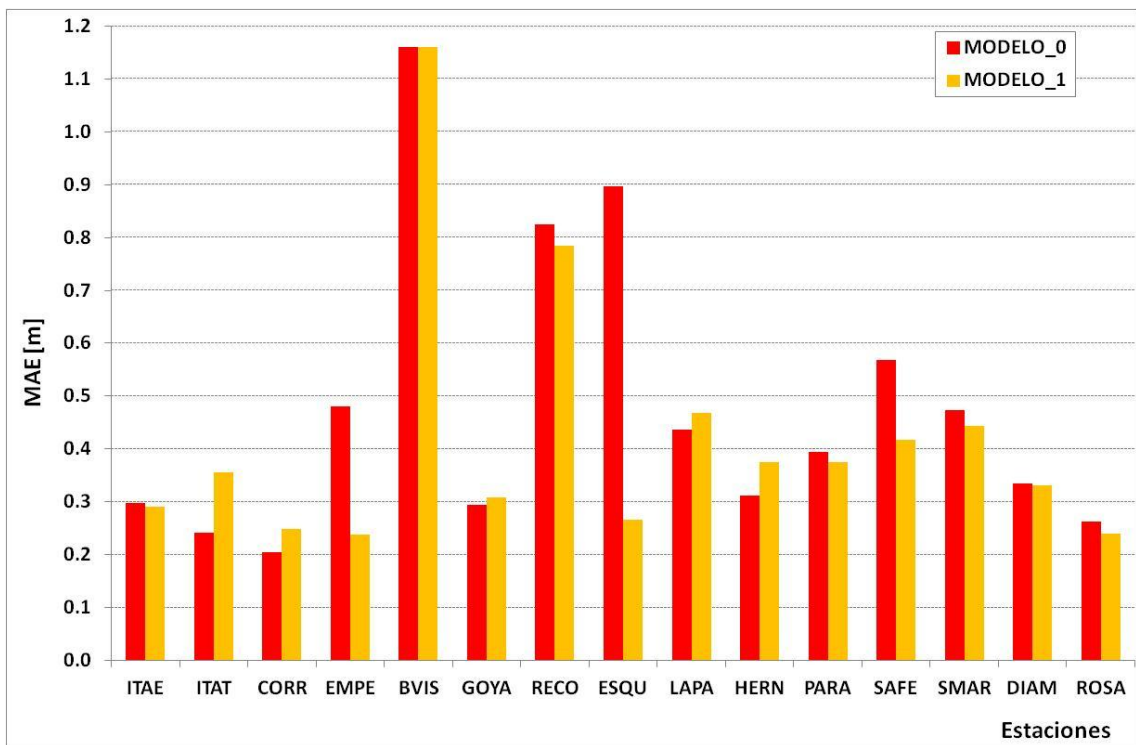


Figura 3.5. Error Medio Absoluto para la Serie 1.

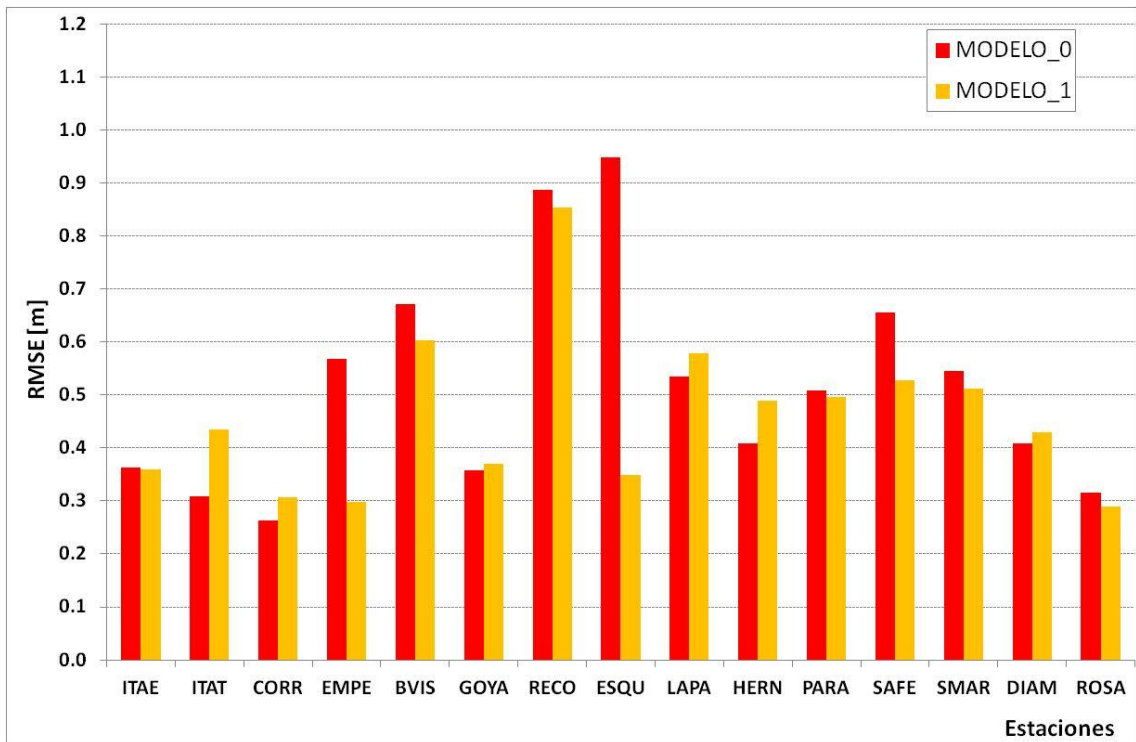


Figura 3.6. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) para la Serie 1.

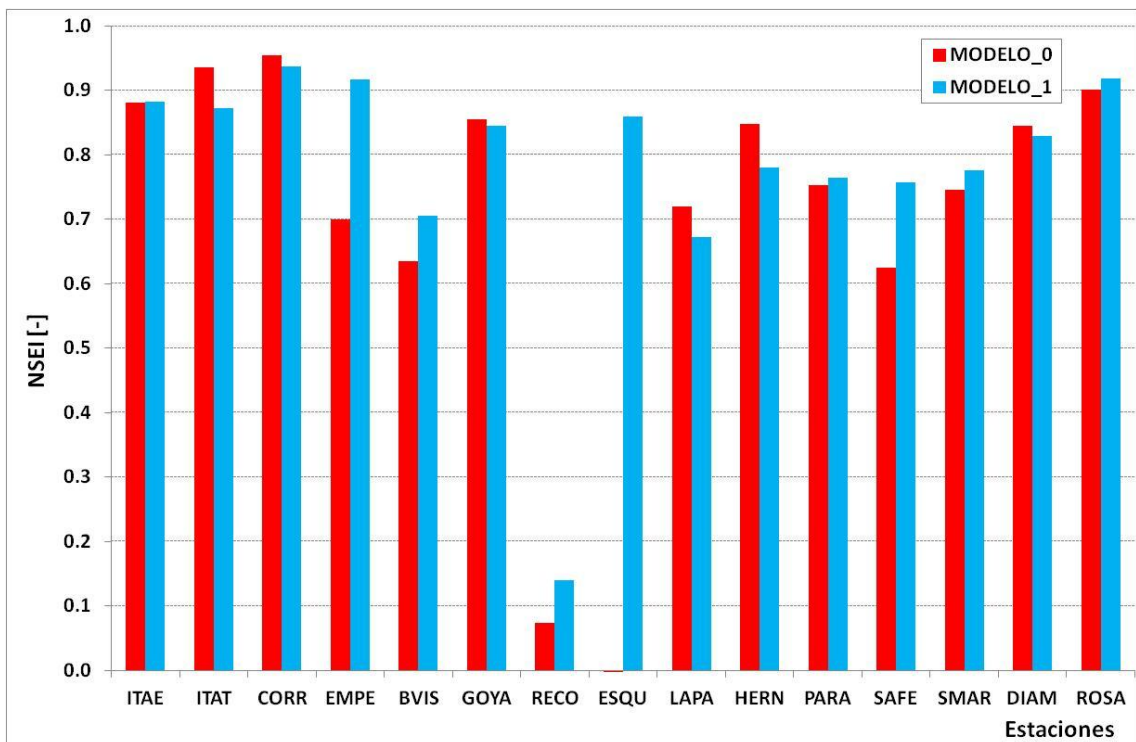


Figura 3.7. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe para la Serie 1.

Si observamos los errores medios, las estaciones Reconquista y Esquina muestran los valores más altos. El modelo M01 presenta una mejora general. Las mayores disminuciones del error medio se ven en Empedrado (30 cm), Esquina (80 cm) y Santa Fe (30 cm).

Las conclusiones de los resultados del error medio absoluto y de la raíz del error cuadrático medio son similares. Se destacan las disminuciones en Empedrado y Esquina.

Analizando el índice NSEI, se observa que para el modelo operativo, 5 estaciones presentan valores menores a 0.7, todas ellas ubicadas en el Paraná Medio (Empedrado, Bella Vista, Reconquista, Esquina y Santa Fe). Con el nuevo modelo todas ellas mejoran su performance, destacándose el aumento del índice en Empedrado y Esquina. El menor índice lo presenta la estación Reconquista (probablemente por estar en un brazo secundario del río y tomarla como si estuviera en el brazo principal).

Globalmente, se ve una mejora en la performance del Modelo 01, respecto del modelo operativo actual. El índice NSEI promedio de todas las estaciones aumenta de 0.70 a 0.78. El error medio absoluto (MAE) promedio disminuye de 0.48 m a 0.42 m. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) promedio baja de 0.52 m a 0.46 m. El resto de los indicadores se mantienen prácticamente constantes para ambos modelos.

Tabla 3.2. Indicadores de performance. Serie 1.

	EM		MAE		RMSE		MAXE		MINE		NSEI	
	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1
ITAE	0.12	0.20	0.30	0.29	0.36	0.36	1.31	1.27	-1.03	-1.06	0.88	0.88
ITAT	0.02	-0.33	0.24	0.36	0.31	0.44	1.33	0.67	-1.55	-1.75	0.94	0.87
CORR	-0.02	0.16	0.20	0.25	0.26	0.31	1.10	1.12	-1.47	-1.26	0.95	0.94
EMPE	-0.43	0.12	0.48	0.24	0.57	0.30	0.92	1.32	-1.46	-1.08	0.70	0.92
BVIS	-0.49	0.53	1.16	1.16	0.67	0.60	1.47	1.46	-1.98	-0.65	0.64	0.71
GOYA	0.22	0.23	0.29	0.31	0.36	0.37	1.02	1.07	-0.82	-0.75	0.86	0.85
RECO	0.82	0.78	0.83	0.78	0.89	0.85	1.71	1.74	-0.44	-0.52	0.07	0.14
ESQU	0.90	-0.11	0.90	0.27	0.95	0.35	1.60	0.66	-0.38	-1.40	-0.04	0.86
LAPA	-0.37	-0.42	0.44	0.47	0.54	0.58	0.99	0.87	-2.10	-2.12	0.72	0.67
HERN	0.02	0.05	0.31	0.37	0.41	0.49	1.61	1.83	-1.73	-1.76	0.85	0.78
PARA	-0.34	-0.24	0.40	0.38	0.51	0.50	1.08	1.27	-1.92	-1.83	0.75	0.77
SAFE	0.48	0.17	0.57	0.42	0.66	0.53	2.06	1.89	-1.34	-1.62	0.62	0.76
SMAR	0.37	0.30	0.47	0.44	0.55	0.51	1.22	1.14	-1.48	-1.27	0.75	0.78
DIAM	0.13	0.00	0.34	0.33	0.41	0.43	1.19	1.30	-1.59	-1.54	0.85	0.83
ROSA	0.15	0.04	0.26	0.24	0.32	0.29	0.95	0.93	-1.44	-1.44	0.90	0.92

3.4.2 Serie 2

Las Figuras 3.8 a 3.13 muestran para cada una de las estaciones, los de los distintos índices analizados. La Tabla 3.3 resume los valores de las figuras anteriormente mencionadas.

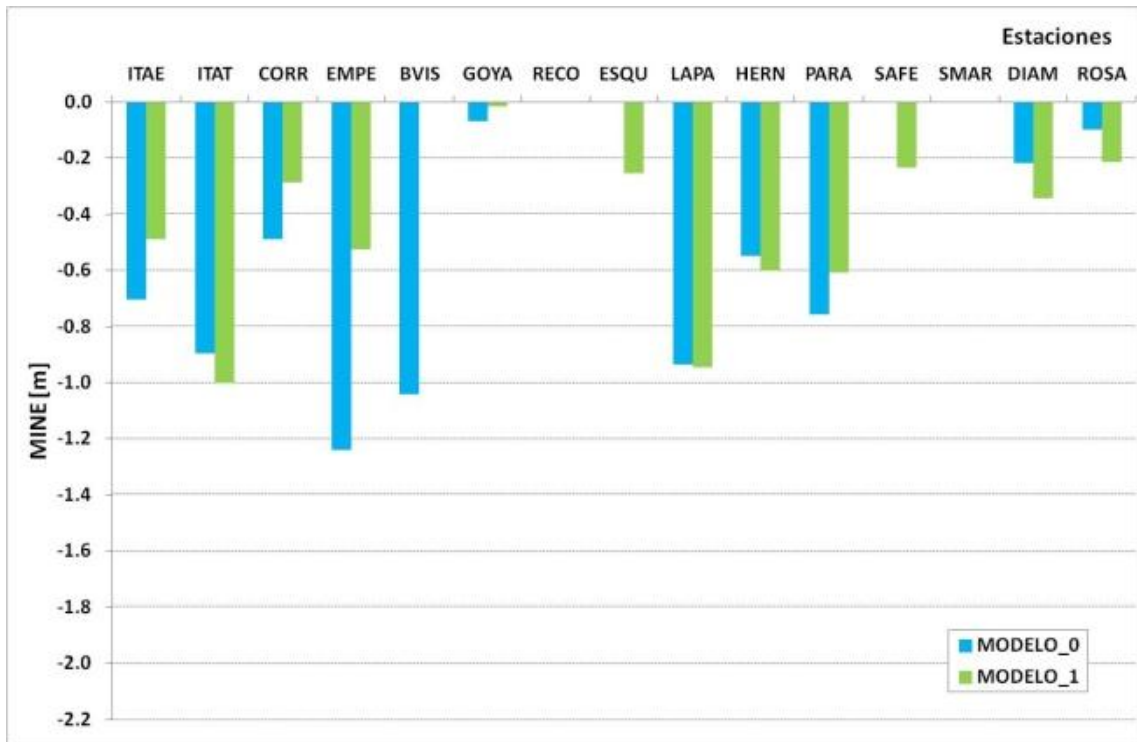


Figura 3.8. Error Mínimo (MINE) para la Serie 2.

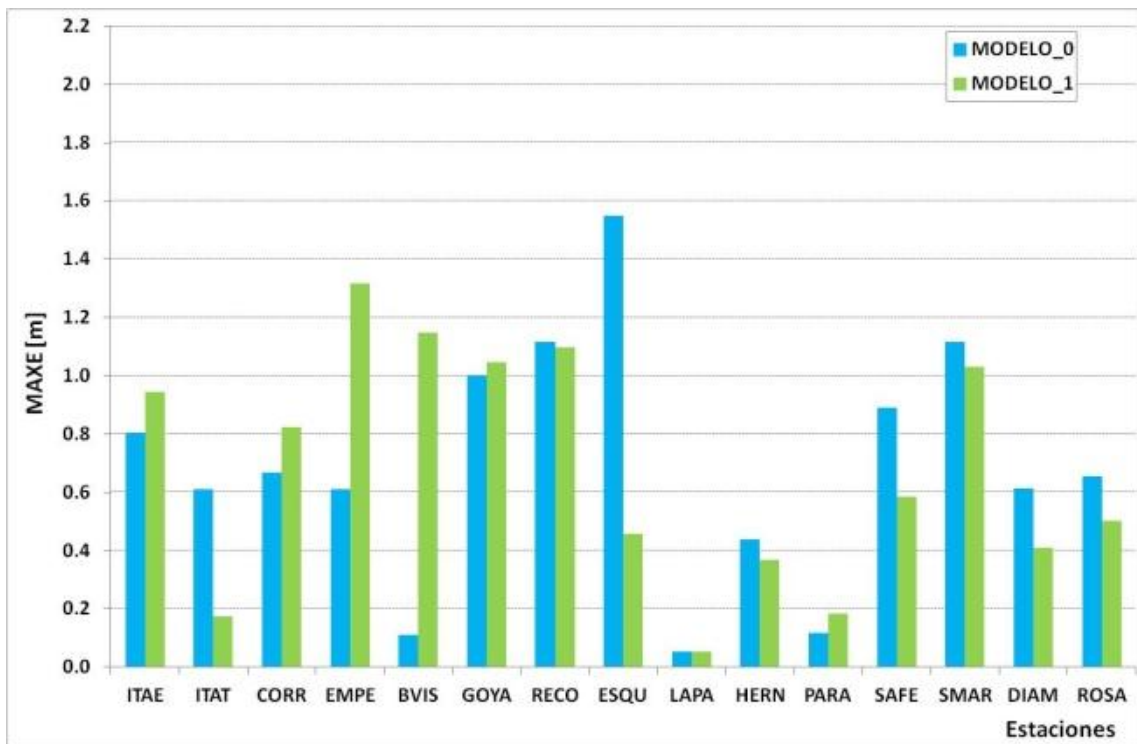


Figura 3.9. Error Máximo (MAXE) para la Serie 2.

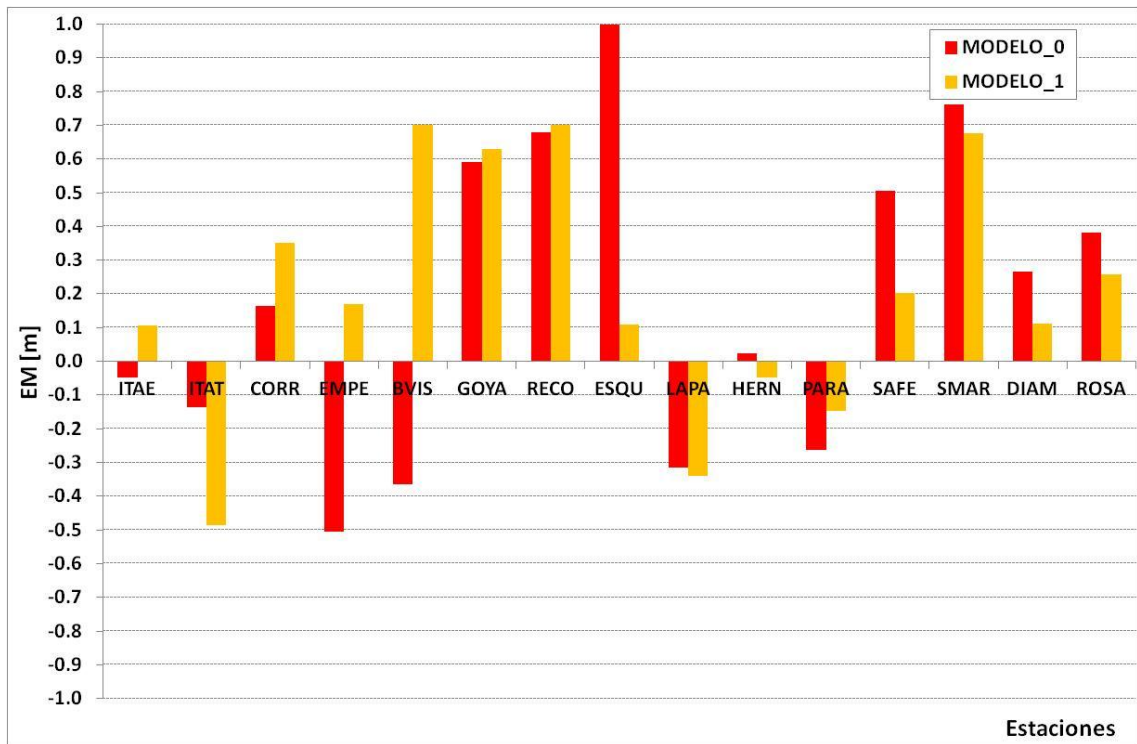


Figura 3.10. Error Medio (EM) para la Serie 2.

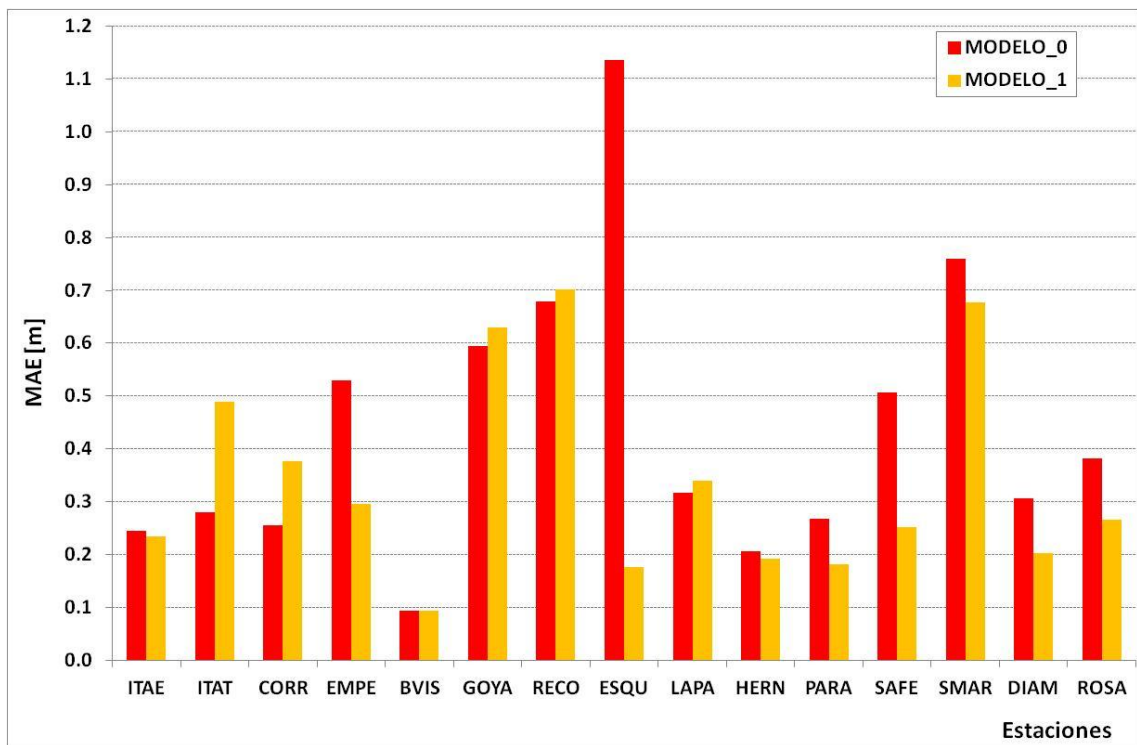


Figura 3.11. Error Medio Absoluto (MAE) para la Serie 2.

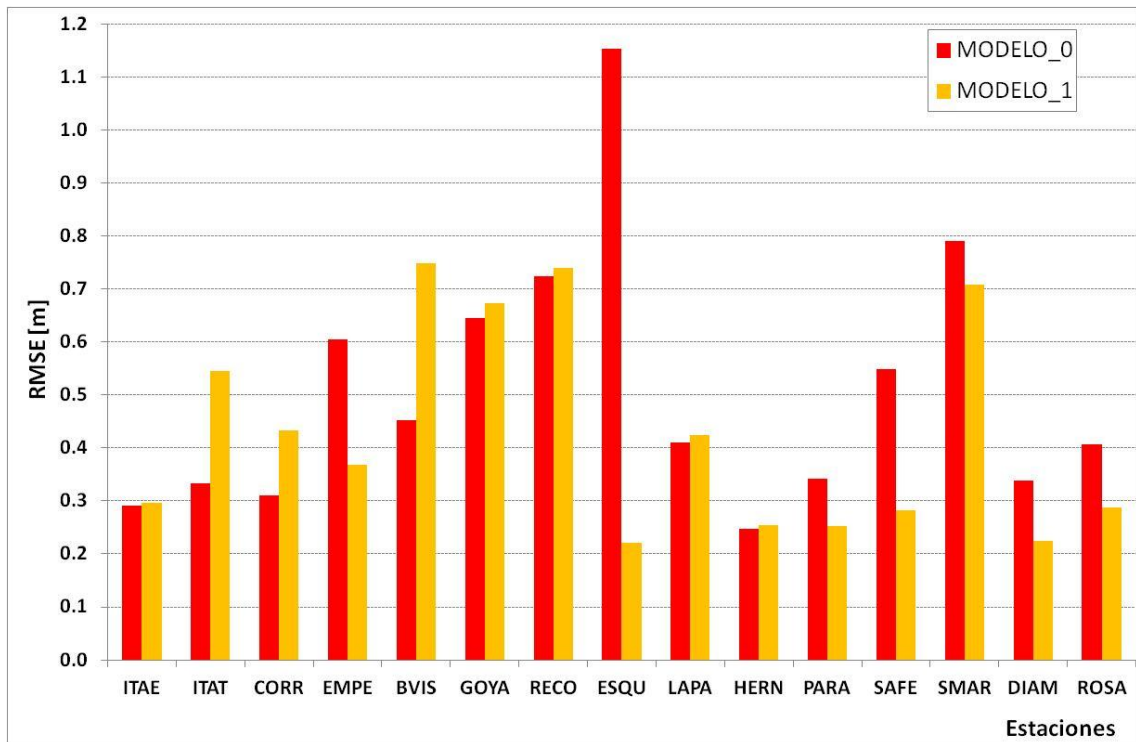


Figura 3.12. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) para la Serie 2.

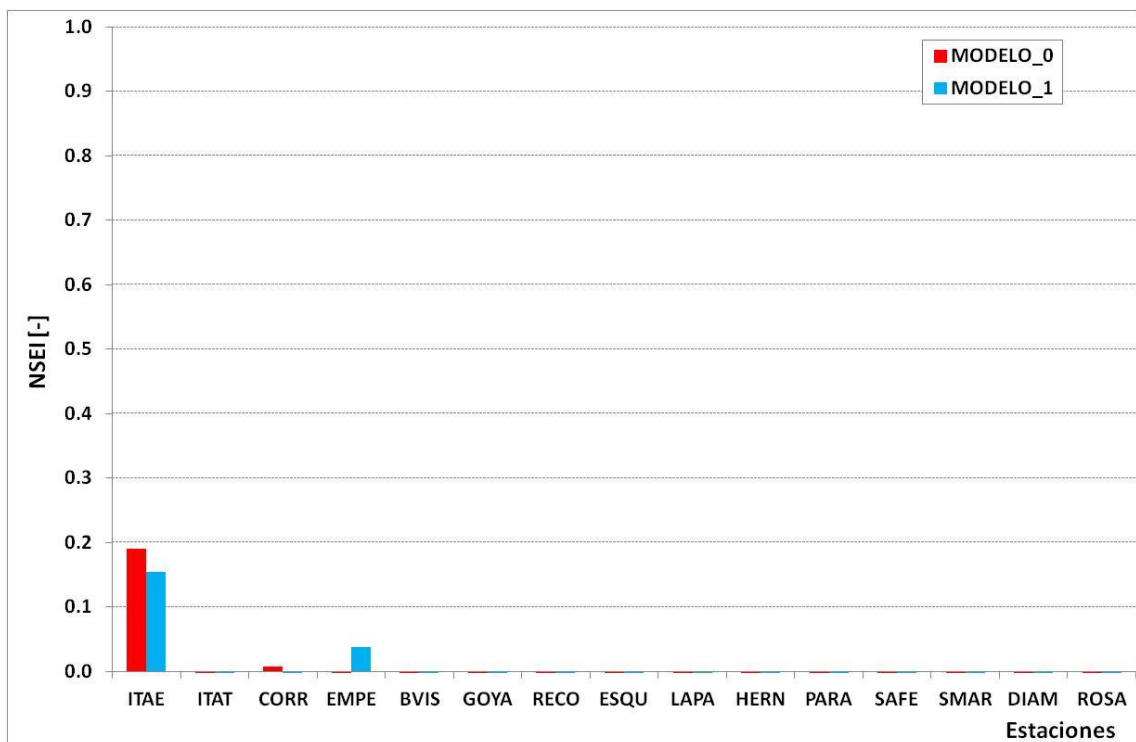


Figura 3.13. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSEI) para la Serie 2.

Observando los indicadores asociados a los errores (error medio, EM, RMSE, MAE, MAXE, MINE) vemos que con el modelo M01 mejoran las estaciones Empedrado y Esquina. En el resto de las estaciones no se notan mejoras.

La performance de los modelos M00 y M01, según el indicador NSEI es muy pobre en todas las estaciones (Figura 3.13). Esta situación puede deberse a que en un período de aguas bajas, como el representado por la Serie 2, quedan expuestas problemáticas asociadas a la mala representación del cauce y a rugosidades inadecuadas.

Cuando se analiza el modelo M01, el error medio absoluto (MAE) promedio de todas las estaciones disminuye de 0.44 m a 0.34 m. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) promedio baja de 0.51 m a 0.43 m. El resto de los indicadores se mantienen constantes.

Tabla 3.3. Indicadores de performance. Serie 2.

	EM		MAE		RMSE		MAXE		MINE		NSEI	
	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1
ITAE	-0.05	0.11	0.25	0.24	0.29	0.30	0.80	0.95	-0.70	-0.49	0.19	0.15
ITAT	-0.14	-0.49	0.28	0.49	0.33	0.55	0.61	0.18	-0.89	-1.00	-0.03	-1.74
CORR	0.16	0.35	0.26	0.38	0.31	0.43	0.67	0.82	-0.49	-0.29	0.01	-0.93
EMPE	-0.51	0.17	0.53	0.30	0.61	0.37	0.61	1.32	-1.24	-0.52	-1.60	0.04
BVIS	-0.37	0.70	0.09	0.09	0.45	0.75	0.11	1.15	-1.04	0.04	-1.18	-4.97
GOYA	0.59	0.63	0.59	0.63	0.65	0.67	1.00	1.05	-0.07	-0.02	-4.57	-5.09
RECO	0.68	0.70	0.68	0.70	0.72	0.74	1.12	1.10	0.02	0.07	-7.24	-7.59
ESQU	1.14	0.11	1.14	0.18	1.15	0.22	1.55	0.46	0.77	-0.25	-83.50	-2.08
LAPA	-0.32	-0.34	0.32	0.34	0.41	0.43	0.05	0.05	-0.94	-0.94	-1.61	-1.80
HERN	0.02	-0.05	0.21	0.19	0.25	0.26	0.44	0.37	-0.55	-0.60	-0.12	-0.18
PARA	-0.26	-0.15	0.27	0.18	0.34	0.25	0.12	0.18	-0.76	-0.61	-1.72	-0.49
SAFE	0.51	0.20	0.51	0.25	0.55	0.28	0.89	0.59	0.03	-0.23	-7.53	-1.27
SMAR	0.76	0.68	0.76	0.68	0.79	0.71	1.12	1.03	0.16	0.05	-6.82	-5.28
DIAM	0.27	0.11	0.31	0.20	0.34	0.22	0.61	0.41	-0.22	-0.34	-1.41	-0.06
ROSA	0.38	0.26	0.38	0.27	0.41	0.29	0.66	0.50	-0.10	-0.21	-2.22	-0.61

3.4.3 Serie 3

Las Figuras 3.14 a 3.19 muestran para cada una de las estaciones los distintos índices analizados. La Tabla 3.4 resume los valores de las figuras anteriormente mencionadas.

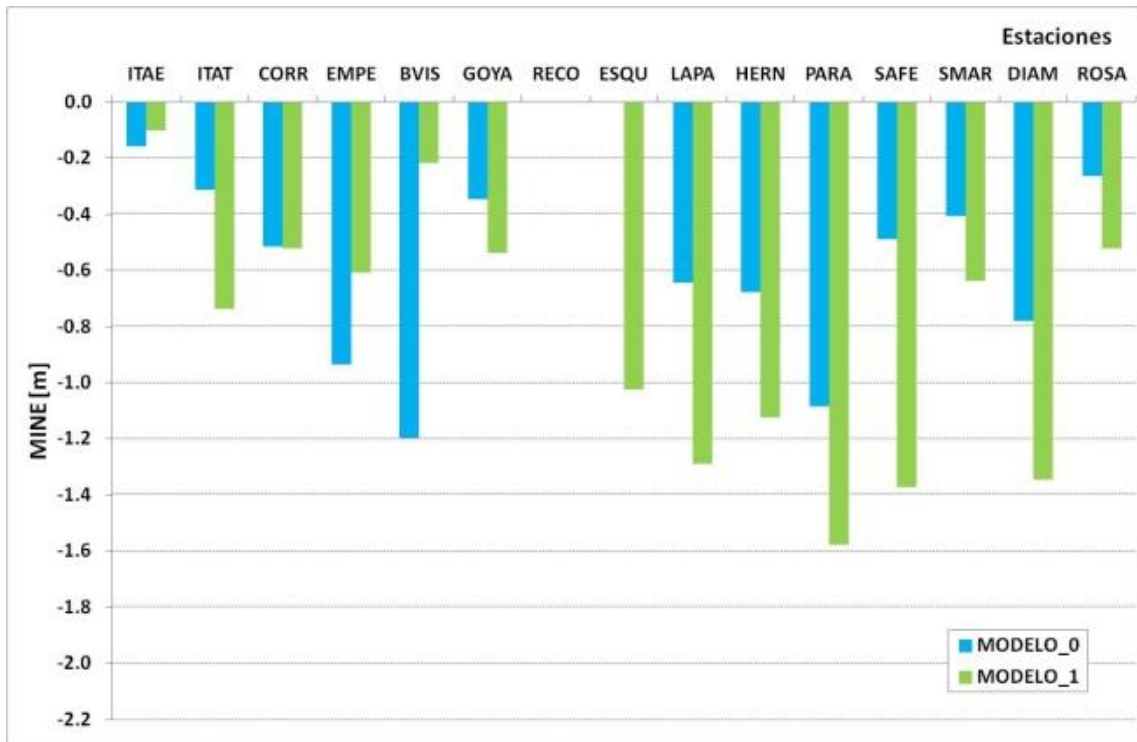


Figura 3.14. Error Mínimo (MINE) para la Serie 3.

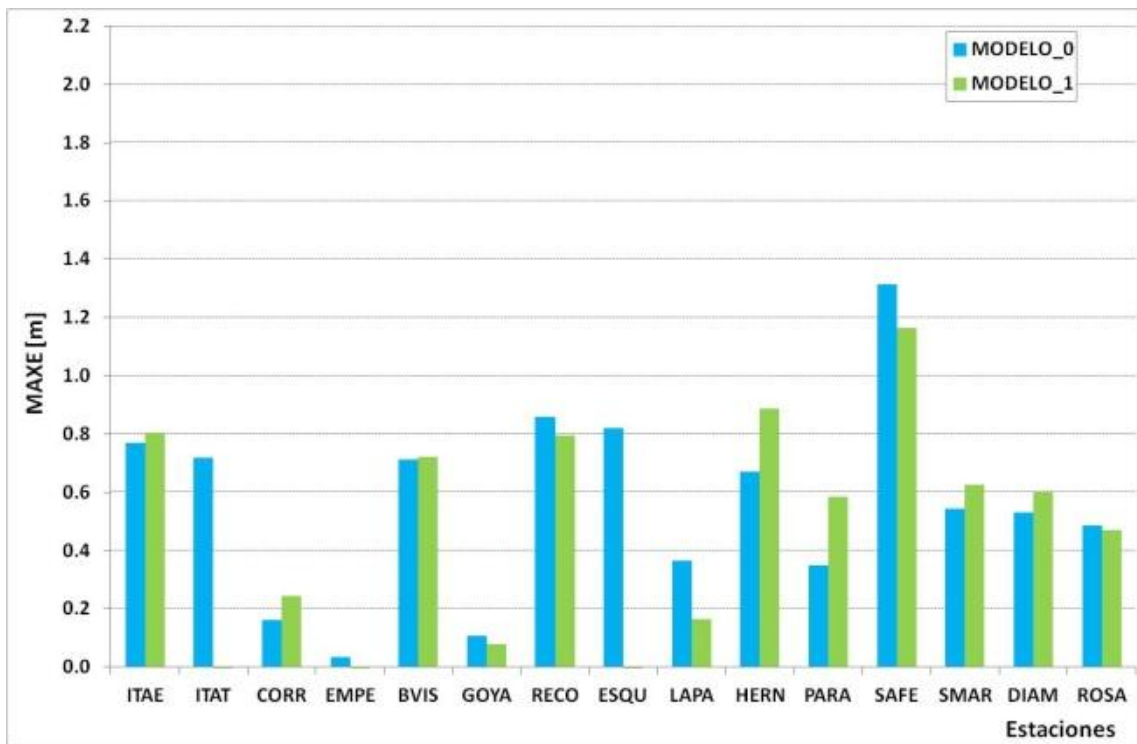


Figura 3.15. Error Máximo (MAXE) para la Serie 3.

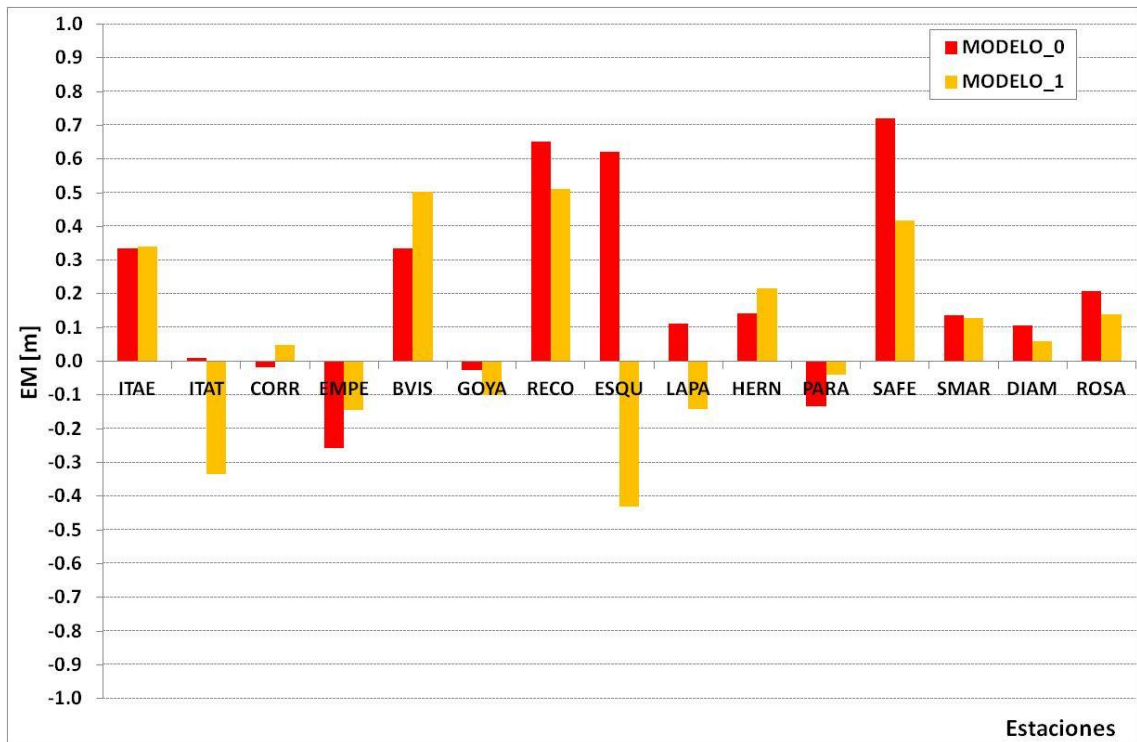


Figura 3.16. Error Medio (EM) para la Serie 3.

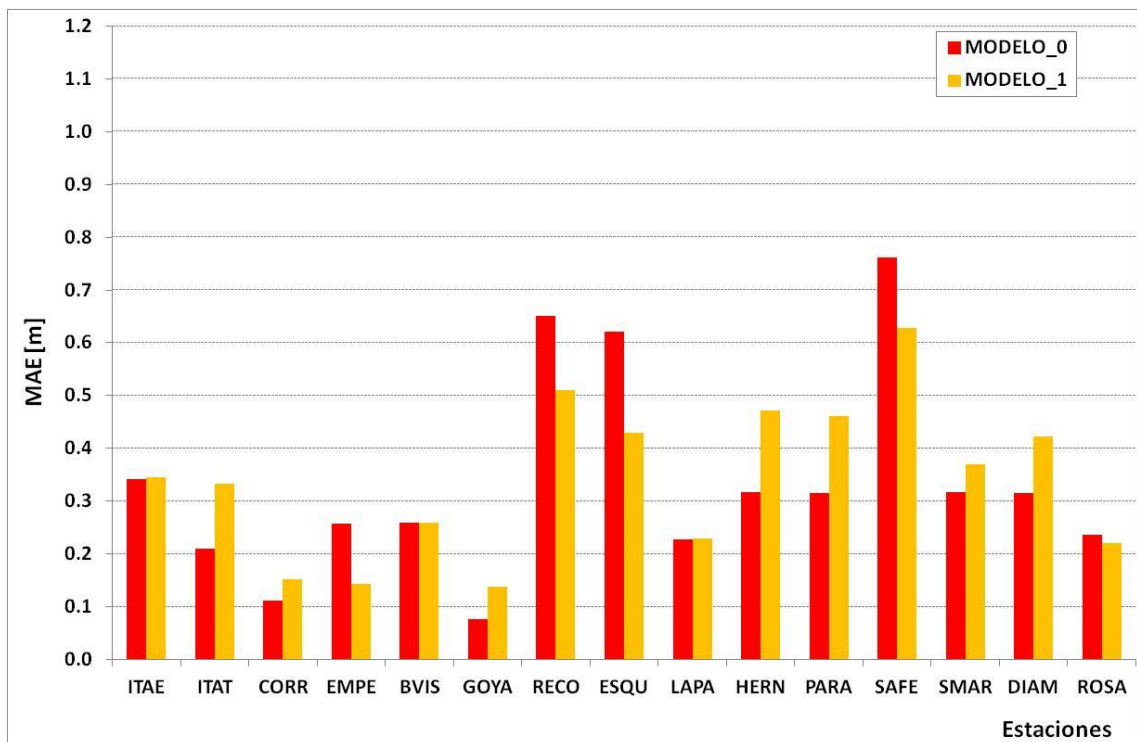


Figura 3.17. Error Medio Absoluto (MAE) para la Serie 3.

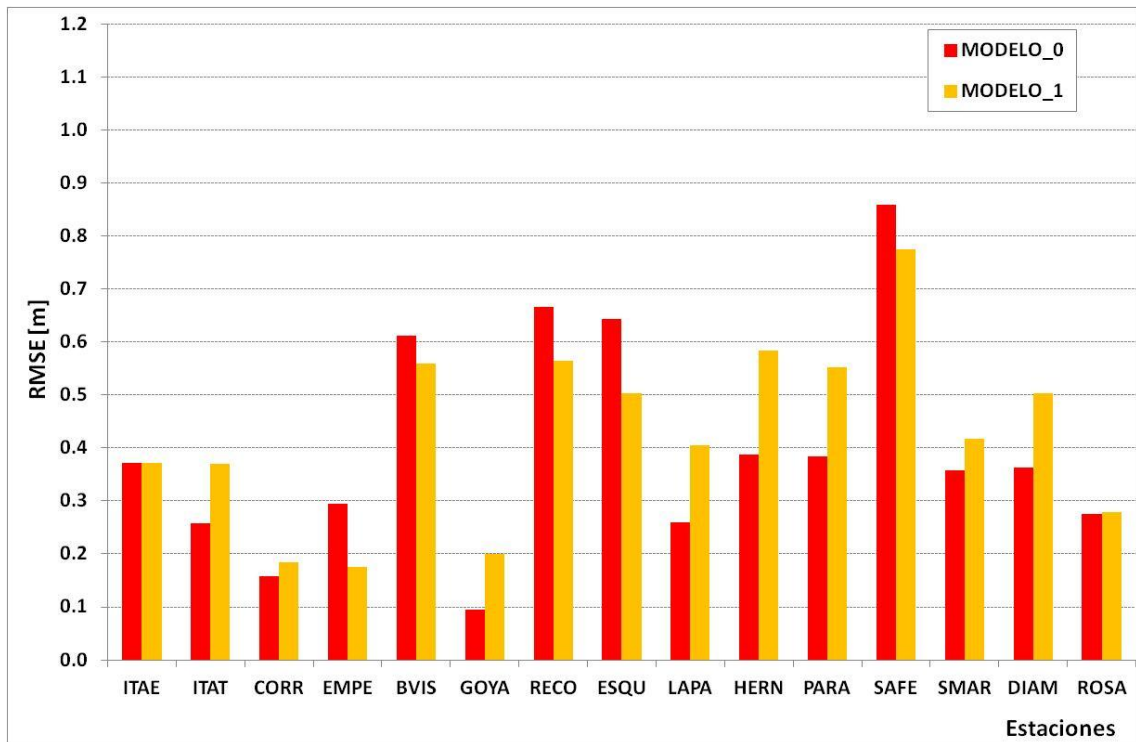


Figura 3.18. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) para la Serie 3.

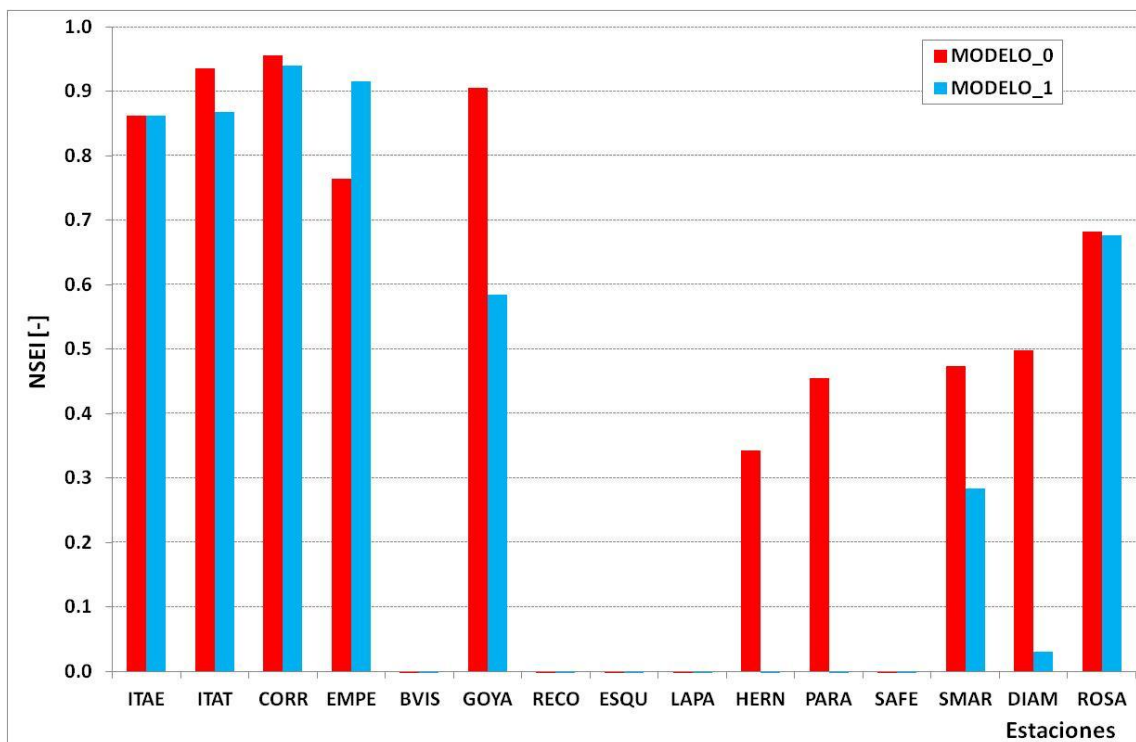


Figura 3.19. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSEI) para la Serie 3.

Para esta Serie, no se nota una mejora global del Modelo 01 respecto del Modelo 00. El error medio absoluto (MAE) promedio de todas las estaciones se mantiene en 0.34 m. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) promedio se encuentra para ambos modelos en 0.43 m.

Las estaciones Bella Vista, Reconquista, Esquina, La Paz y Santa Fe muestran una performance muy pobre para el Modelo 00, según el indicador NSEI. Cuando se analiza el Modelo 01, se ve que el mismo empeora los resultados de este indicador en las estaciones Hernandarias y Paraná.

Tabla 3.4. Indicadores de performance. Serie 3.

	EM		MAE		RMSE		MAXE		MINE		NSEI	
	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1
ITAE	0.34	0.34	0.34	0.35	0.37	0.37	0.77	0.81	-0.16	-0.10	0.86	0.86
ITAT	0.01	-0.33	0.21	0.33	0.26	0.37	0.72	-0.02	-0.31	-0.74	0.94	0.87
CORR	-0.02	0.05	0.11	0.15	0.16	0.18	0.16	0.25	-0.51	-0.52	0.96	0.94
EMPE	-0.26	-0.14	0.26	0.14	0.30	0.18	0.03	-0.03	-0.93	-0.61	0.76	0.92
BVIS	0.33	0.50	0.26	0.26	0.61	0.56	0.71	0.72	-1.20	-0.22	-0.44	-0.20
GOYA	-0.03	-0.10	0.08	0.14	0.10	0.20	0.11	0.08	-0.35	-0.54	0.91	0.58
RECO	0.65	0.51	0.65	0.51	0.67	0.56	0.86	0.80	0.41	0.06	-4.88	-3.21
ESQU	0.62	-0.43	0.62	0.43	0.64	0.50	0.82	-0.18	0.22	-1.03	-10.94	-6.32
LAPA	0.11	-0.14	0.23	0.23	0.26	0.41	0.37	0.17	-0.64	-1.29	-1.46	-5.03
HERN	0.14	0.22	0.32	0.47	0.39	0.58	0.67	0.89	-0.68	-1.12	0.34	-0.49
PARA	-0.13	-0.04	0.31	0.46	0.38	0.55	0.35	0.58	-1.08	-1.58	0.46	-0.13
SAFE	0.72	0.42	0.76	0.63	0.86	0.77	1.31	1.17	-0.49	-1.37	-0.86	-0.51
SMAR	0.14	0.13	0.32	0.37	0.36	0.42	0.54	0.63	-0.41	-0.64	0.47	0.28
DIAM	0.11	0.06	0.31	0.42	0.36	0.50	0.53	0.60	-0.78	-1.35	0.50	0.03
ROSA	0.21	0.14	0.24	0.22	0.28	0.28	0.49	0.47	-0.26	-0.52	0.68	0.68

3.4.4 Serie 4

Las Figuras 3.20 a 3.25 muestran para cada una de las estaciones, los de los distintos índices analizados. La Tabla 3.5 resume los valores de las figuras anteriormente mencionadas.

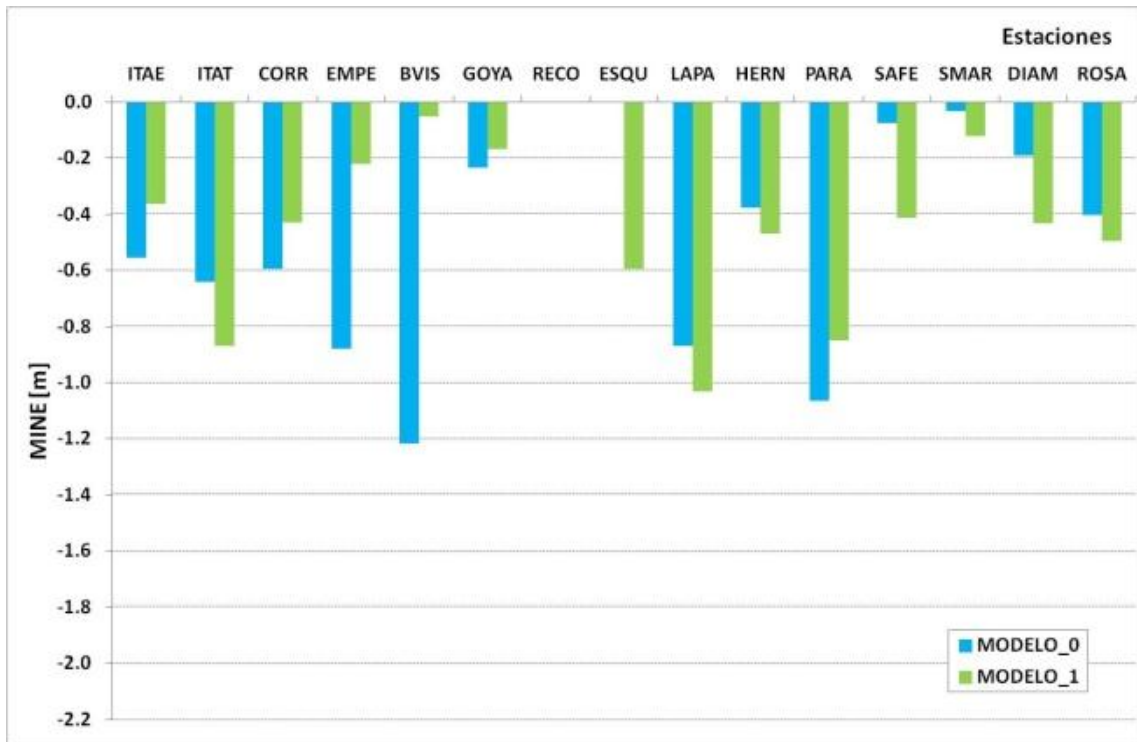


Figura 3.20. Error Mínimo (MINE) para la Serie 4.

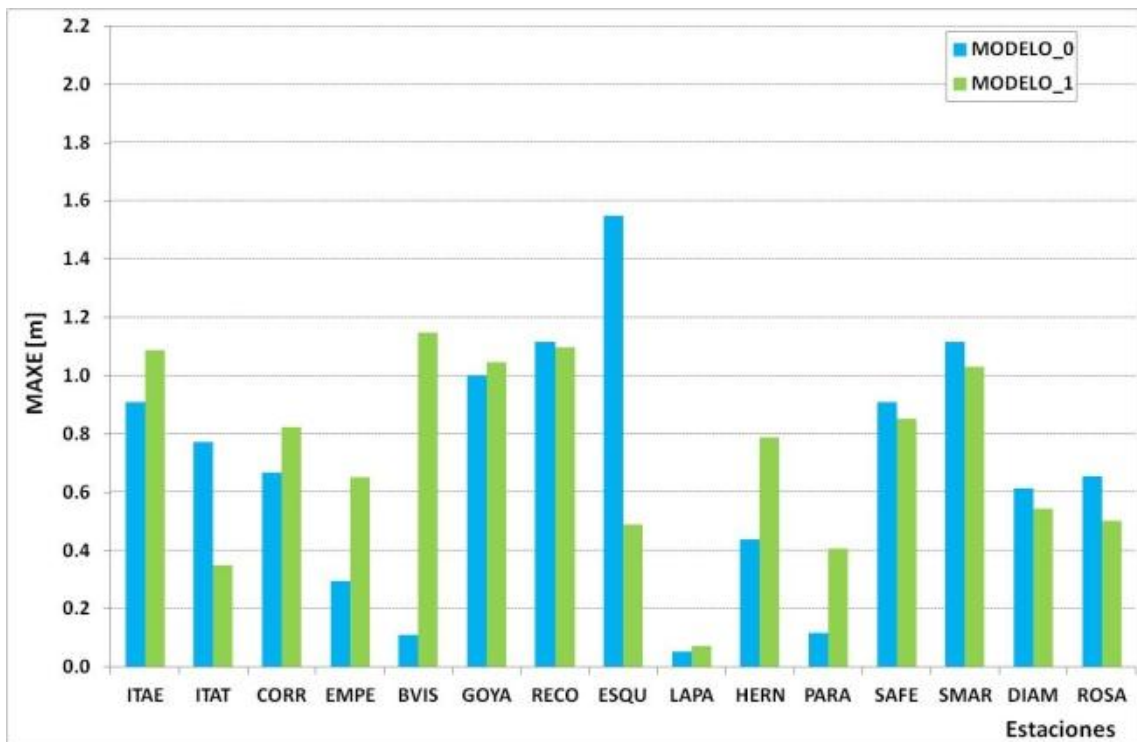


Figura 3.21. Error Máximo (MAXE) para la Serie 4.

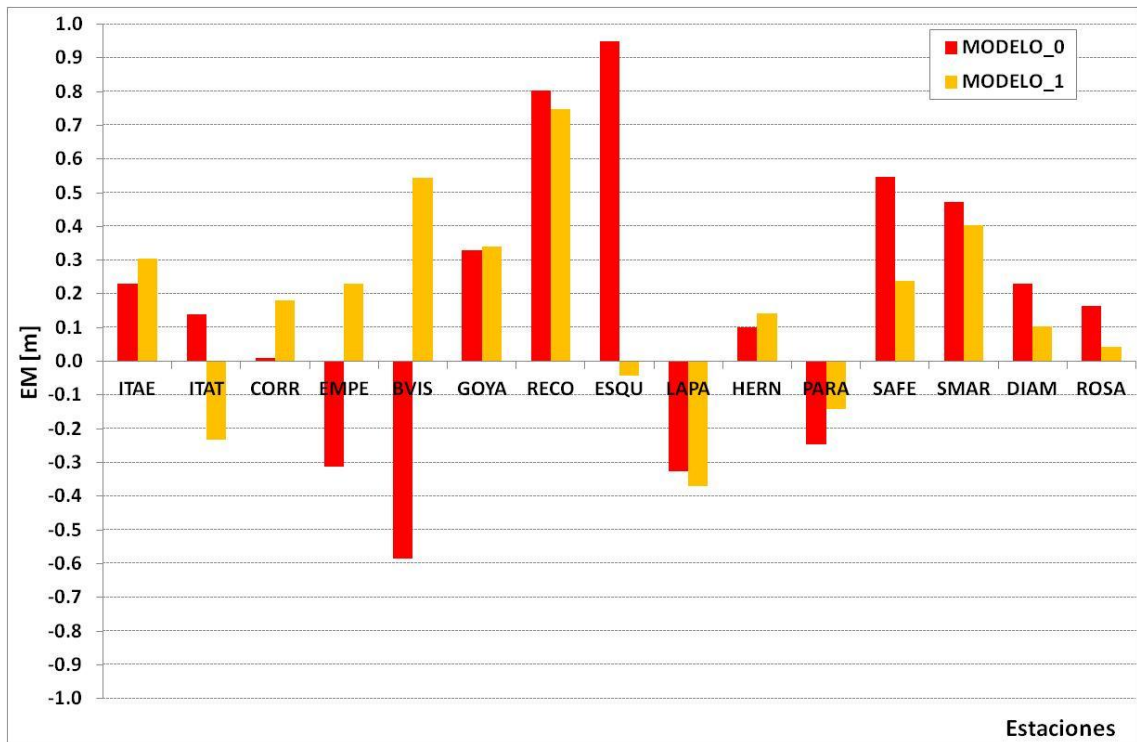


Figura 3.22. Error Medio (EM) para la Serie 4.

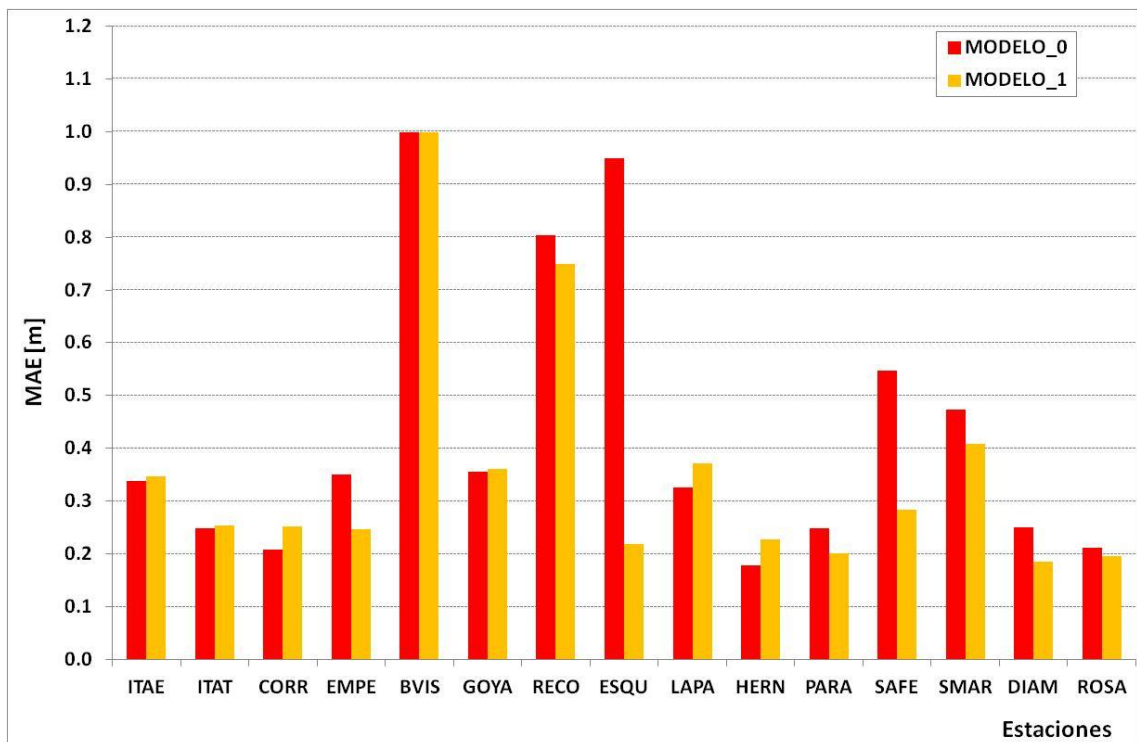


Figura 3.23. Error Medio Absoluto (MAE) para la Serie 4.

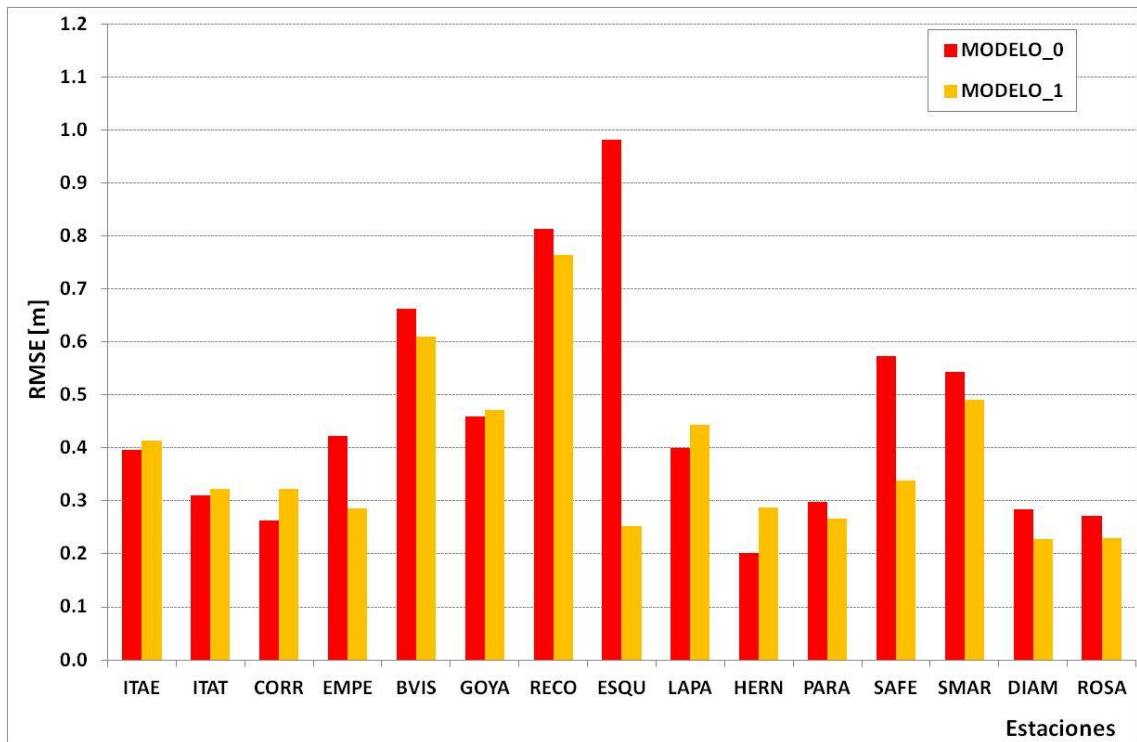


Figura 3.24. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) para la Serie 4.

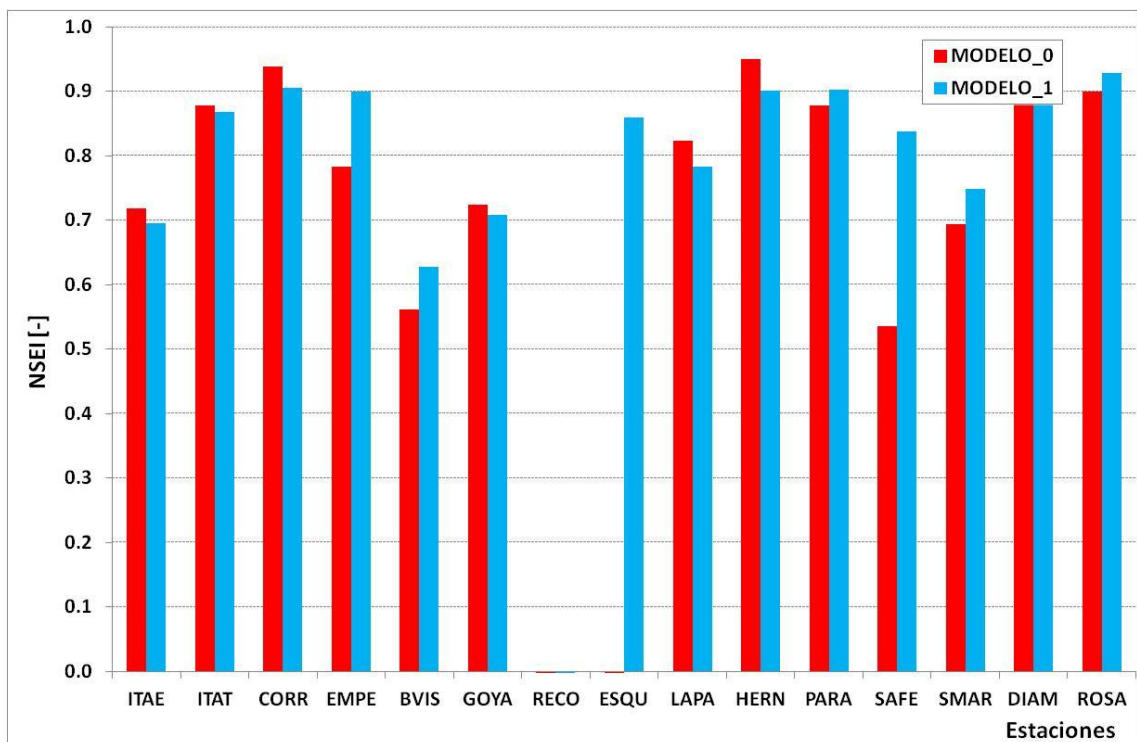


Figura 3.25. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSEI) para la Serie 4.

Analizando todas las estaciones, se ve que con el Modelo 01, el error medio absoluto (MAE) promedio disminuye de 0.43 m a 0.35 m, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) promedio baja de 0.46 m a 0.38 m y el índice NSEI promedio de todas las estaciones aumenta de 0.59 a 0.76. El resto de los indicadores se mantienen prácticamente constantes para ambos modelos.

Si observamos los errores medios absolutos (MAE), las estaciones Bella Vista, Reconquista y Esquina muestran los valores más altos. Las mayores disminuciones del MAE cuando se trabaja con el Modelo 01 se ven en Esquina (70 cm) y Santa Fe (20 cm).

Con el nuevo modelo, el índice NSEI es mayor a 0.7 en todas las estaciones, excepto en Bella Vista (0.63) y en Reconquista (-0.23).

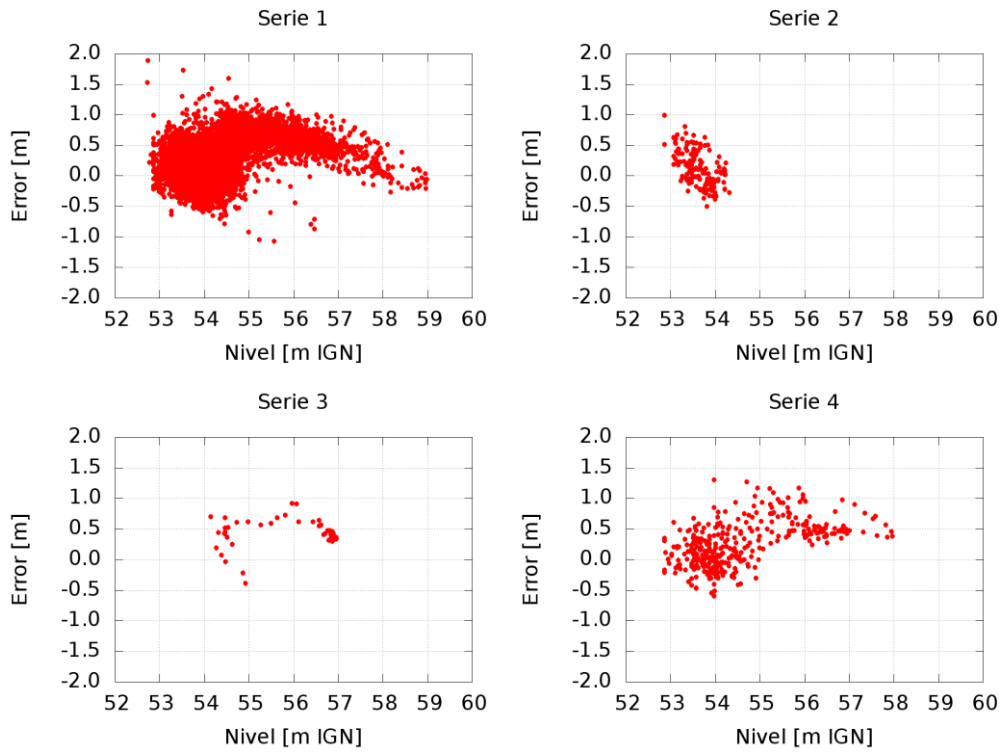
Tabla 3.5. Indicadores de performance. Serie 4.

	EM		MAE		RMSE		MAXE		MINE		NSEI	
	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1	M0	M1
ITAE	0.23	0.30	0.34	0.35	0.40	0.41	0.91	1.09	-0.55	-0.36	0.72	0.70
ITAT	0.14	-0.23	0.25	0.25	0.31	0.32	0.77	0.35	-0.64	-0.87	0.88	0.87
CORR	0.01	0.18	0.21	0.25	0.26	0.32	0.67	0.82	-0.60	-0.43	0.94	0.91
EMPE	-0.31	0.23	0.35	0.25	0.42	0.29	0.29	0.65	-0.88	-0.22	0.78	0.90
BVIS	-0.59	0.55	1.00	1.00	0.66	0.61	0.11	1.15	-1.22	-0.05	0.56	0.63
GOYA	0.33	0.34	0.36	0.36	0.46	0.47	1.00	1.05	-0.23	-0.17	0.72	0.71
RECO	0.80	0.75	0.80	0.75	0.81	0.76	1.12	1.10	0.46	0.40	-0.40	-0.23
ESQU	0.95	-0.04	0.95	0.22	0.98	0.25	1.55	0.49	0.56	-0.60	-1.11	0.86
LAPA	-0.33	-0.37	0.33	0.37	0.40	0.44	0.05	0.07	-0.87	-1.03	0.82	0.78
HERN	0.10	0.14	0.18	0.23	0.20	0.29	0.44	0.79	-0.38	-0.47	0.95	0.90
PARA	-0.25	-0.14	0.25	0.20	0.30	0.27	0.12	0.41	-1.06	-0.85	0.88	0.90
SAFE	0.55	0.24	0.55	0.28	0.57	0.34	0.91	0.85	-0.08	-0.41	0.54	0.84
SMAR	0.47	0.40	0.47	0.41	0.54	0.49	1.12	1.03	-0.03	-0.12	0.69	0.75
DIAM	0.23	0.11	0.25	0.19	0.28	0.23	0.61	0.54	-0.19	-0.43	0.90	0.94
ROSA	0.16	0.04	0.21	0.20	0.27	0.23	0.66	0.50	-0.40	-0.50	0.90	0.93

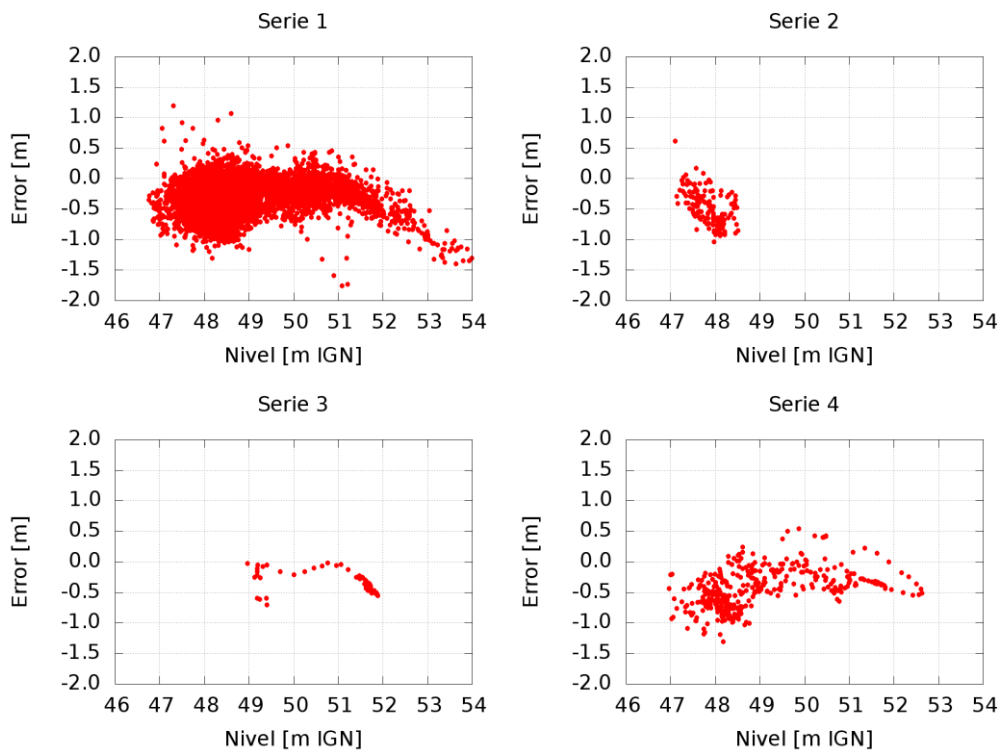
3.5 Evaluación gráfica

3.5.1 Gráficos de dispersión

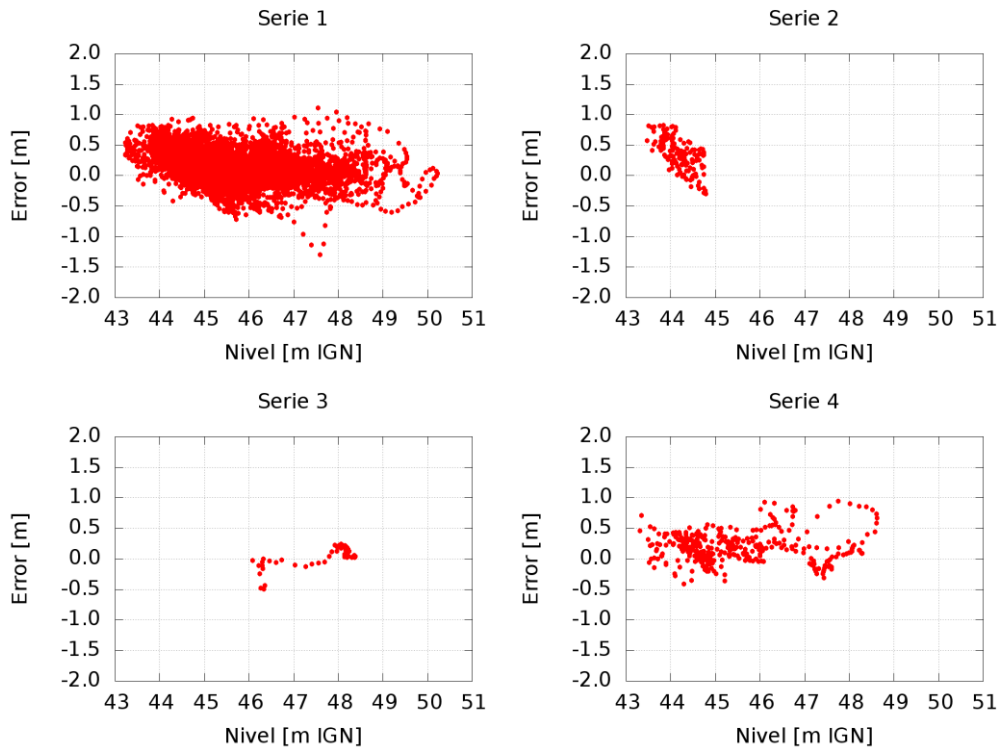
Estos gráficos muestran los errores del modelo en función del nivel del río. Son herramientas que permiten efectuar un rápido análisis sobre el comportamiento del modelo. Si bien se presentan los gráficos de dispersión para las cuatro series, solo se analizarán los resultados para la serie 1, dado que las demás no cuentan con la cantidad suficiente de puntos para que los valores obtenidos sean representativos



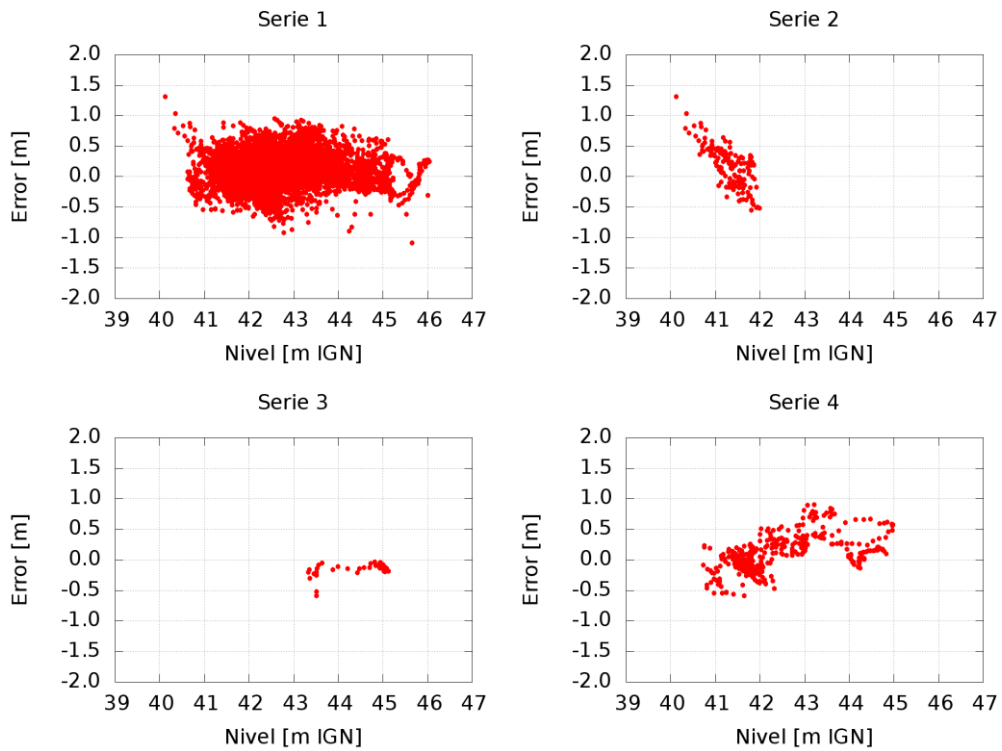
a) Itaibate



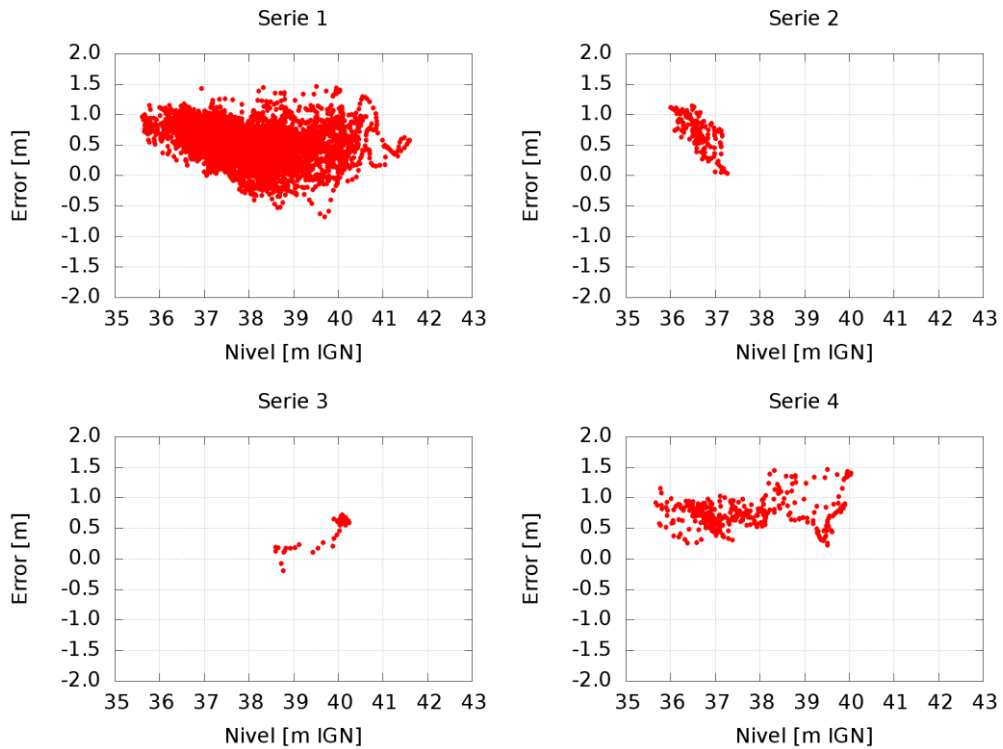
b) Itati



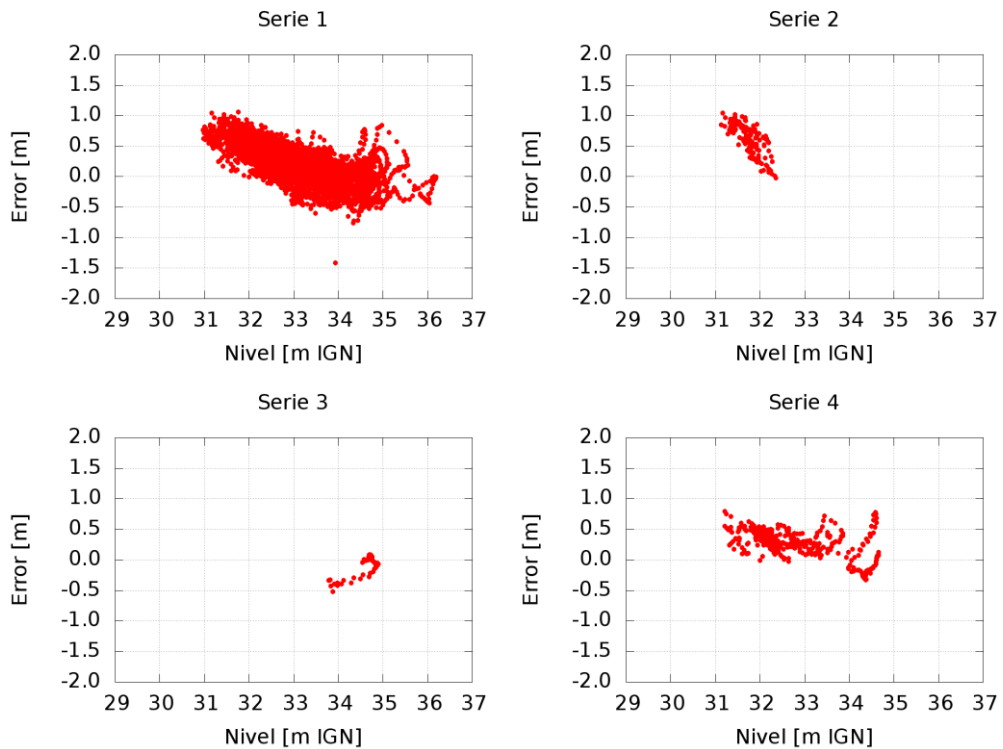
c) Corrientes



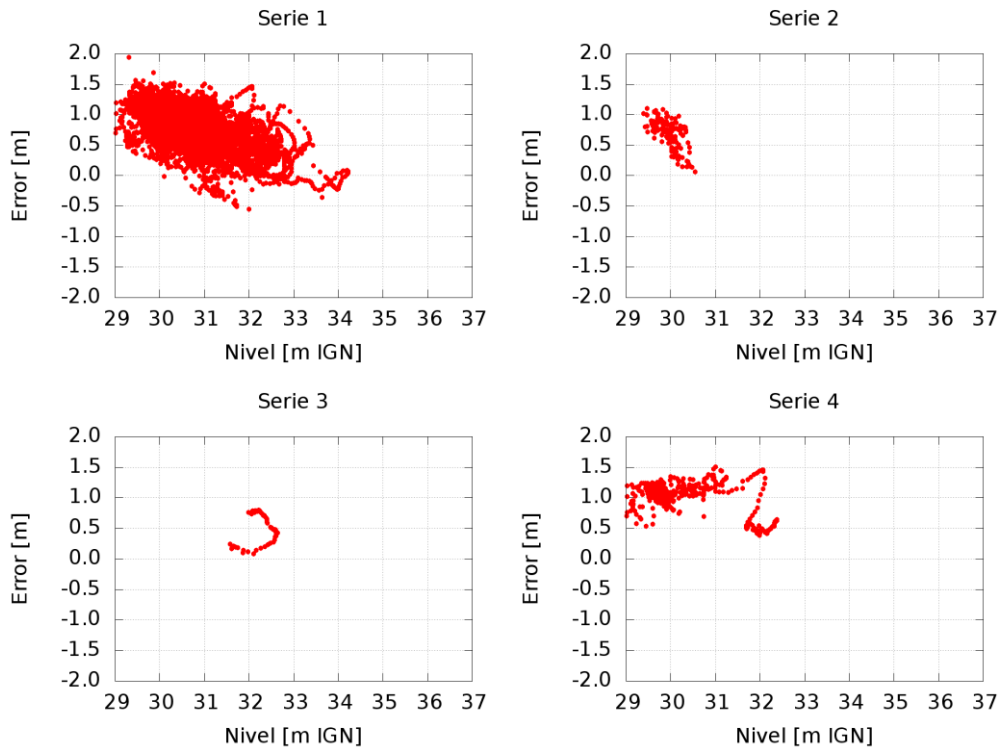
d) Empedrado



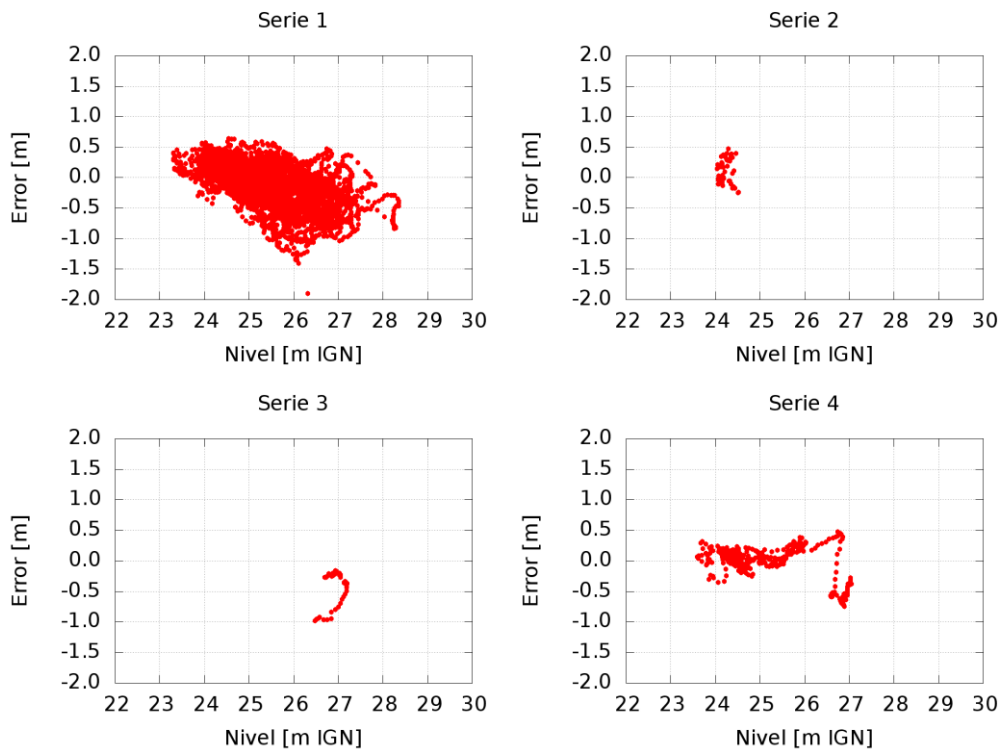
e) Bella Vista



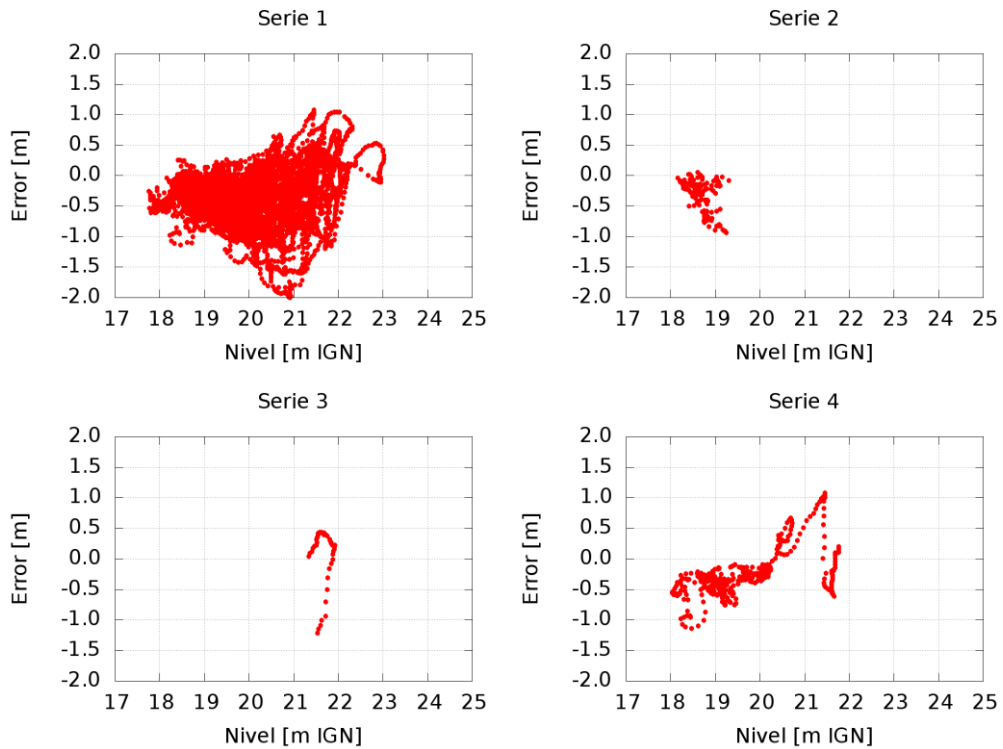
f) Goya



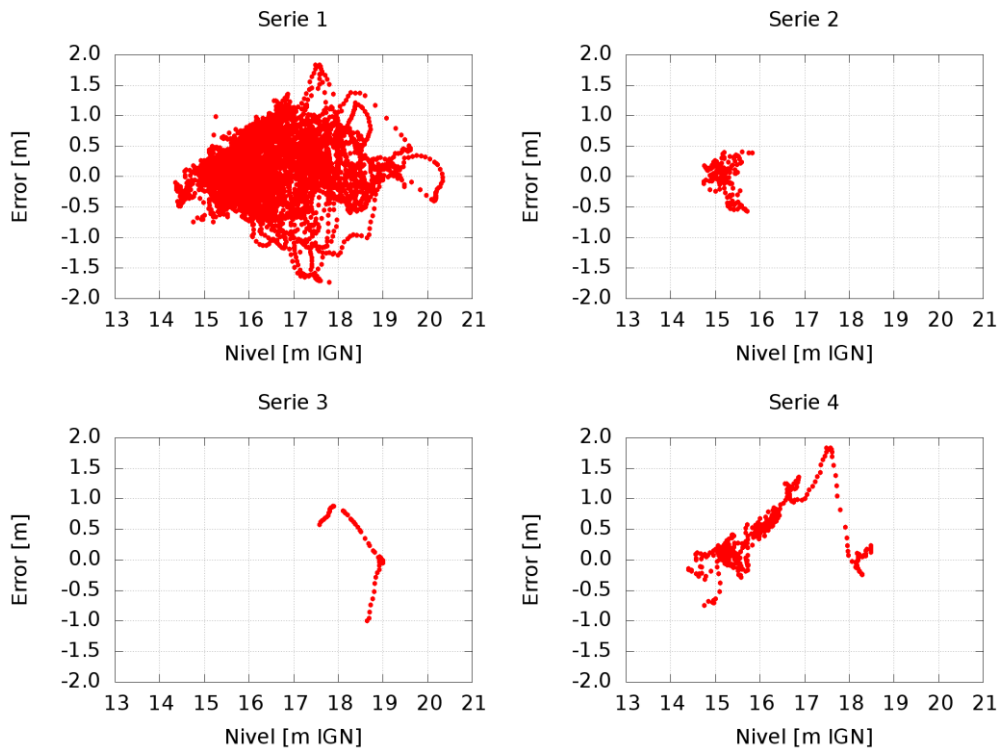
g) Reconquista



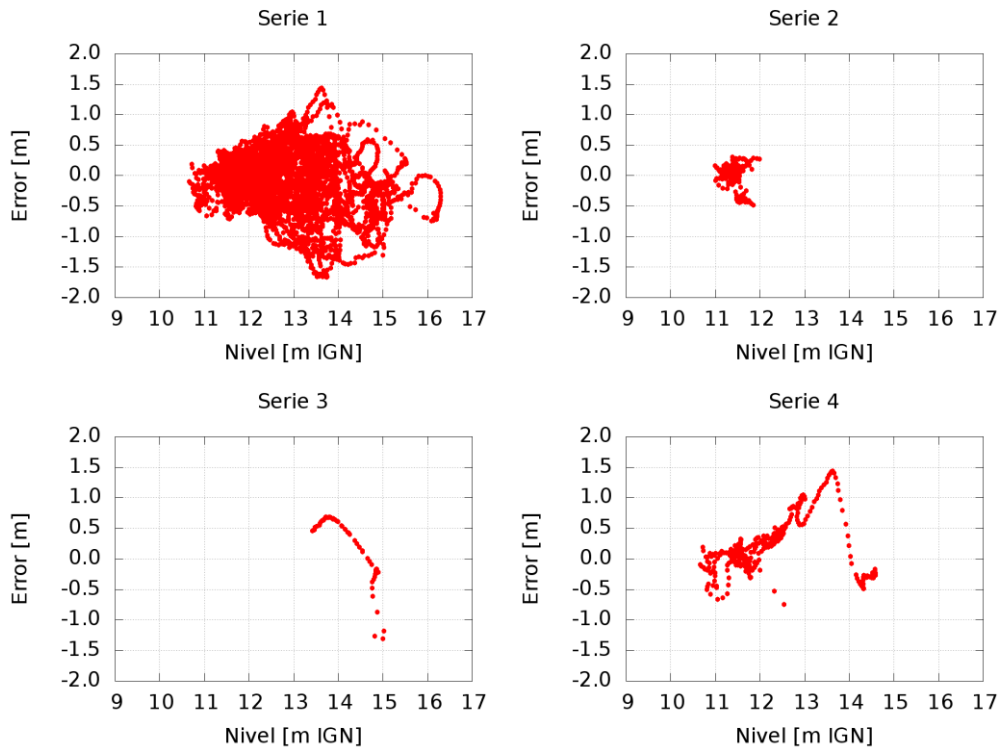
h) Esquina



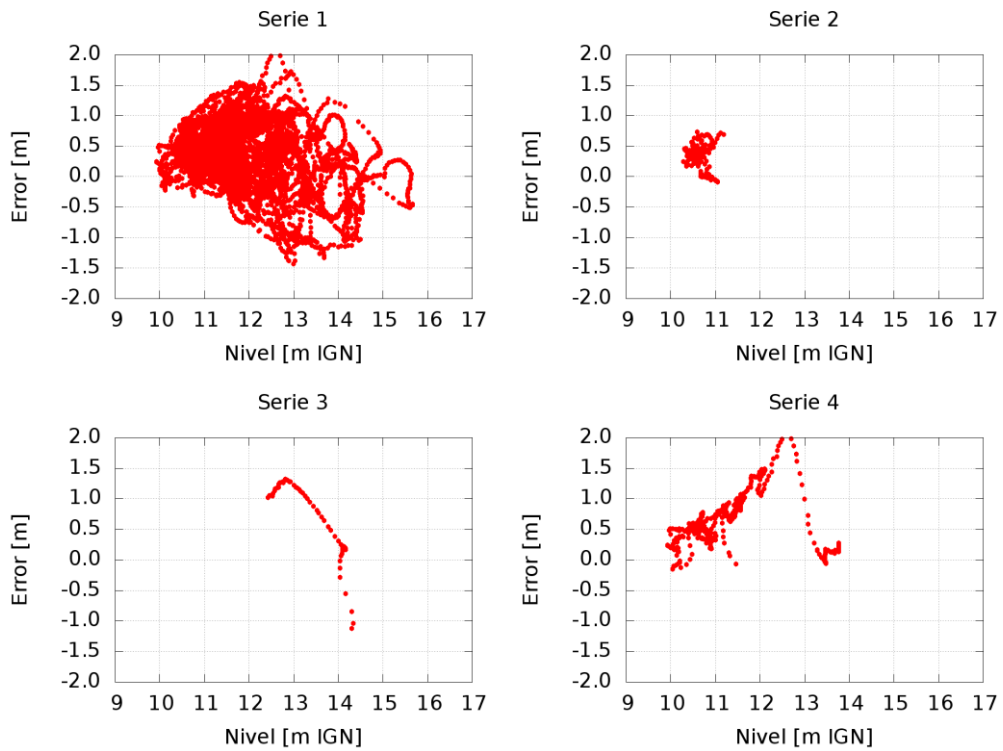
i) La Paz



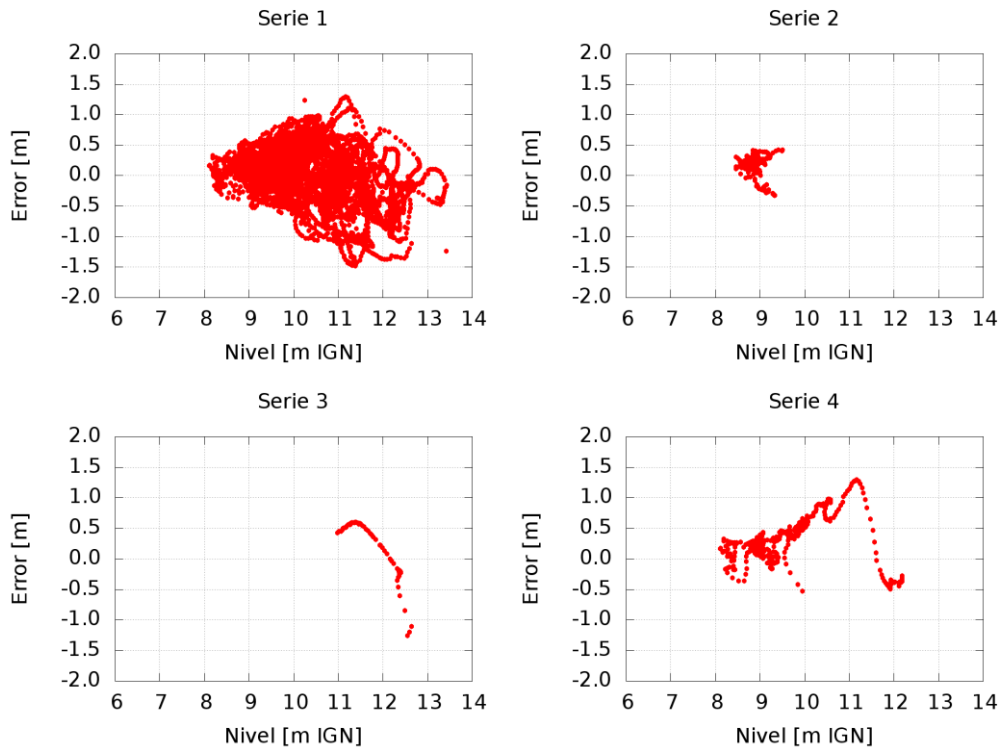
j) Hernandarias



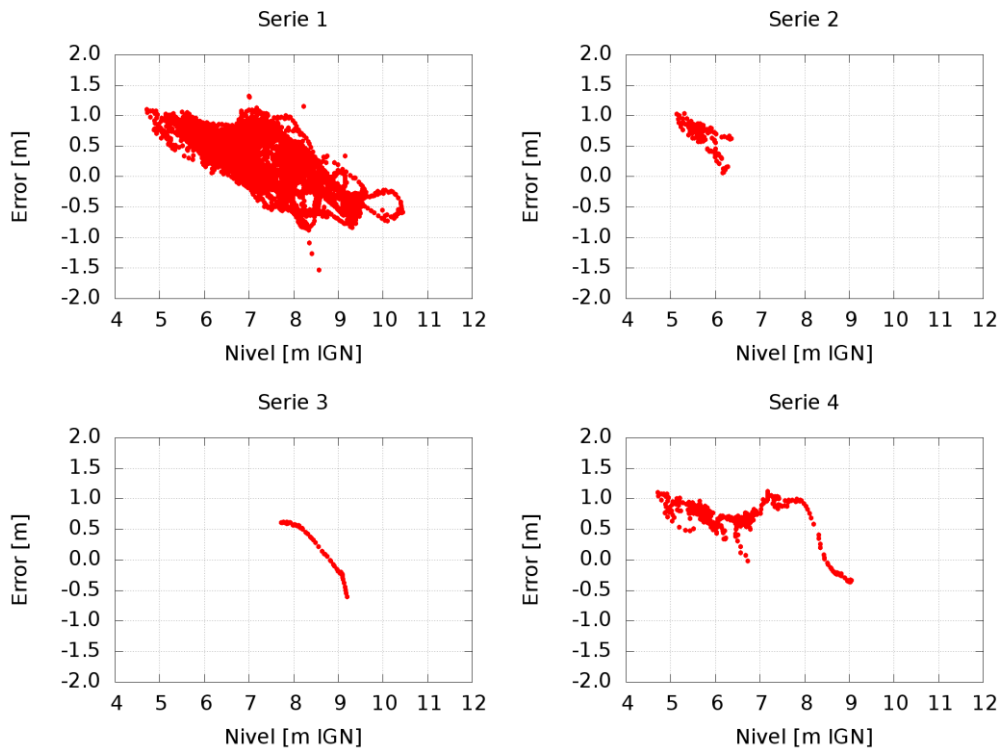
k) Paraná



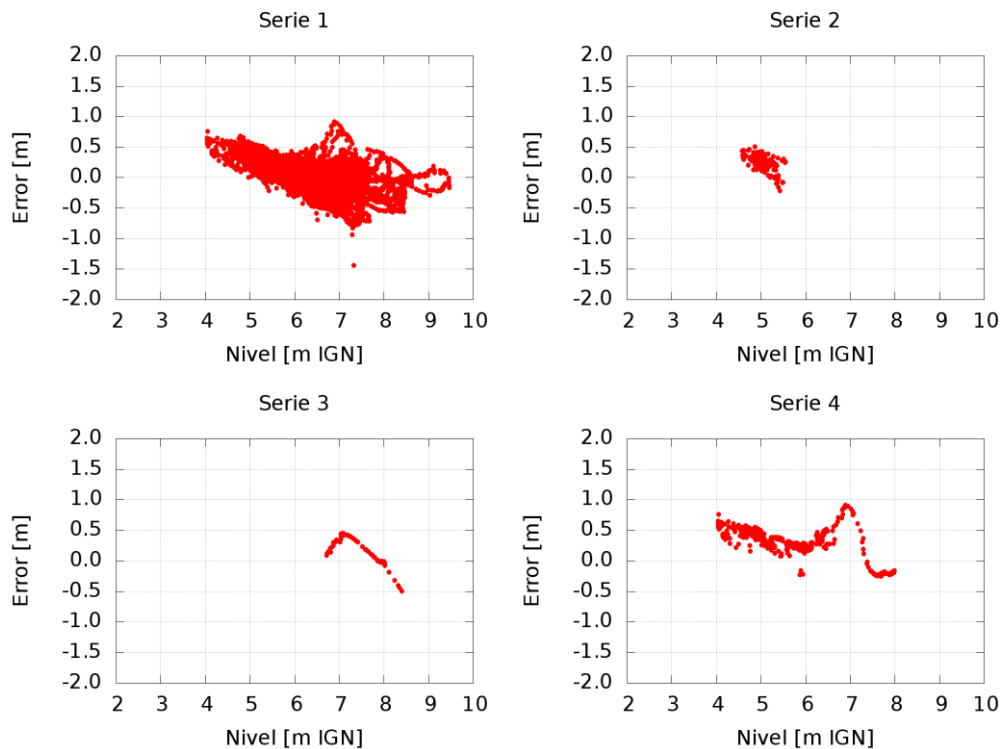
l) Santa Fe



m) Diamante



n) San Martín



ñ) Rosario

Figura 3.26. Nubes de error (Modelo 1). (Simulado menos observado)

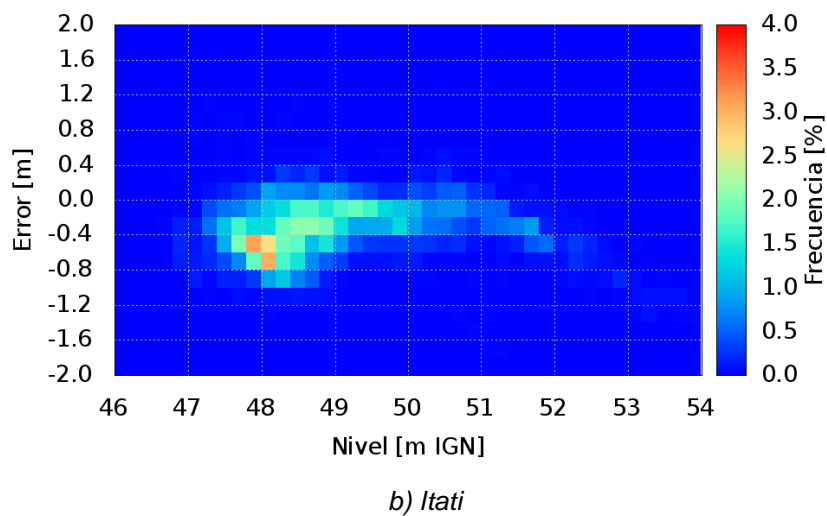
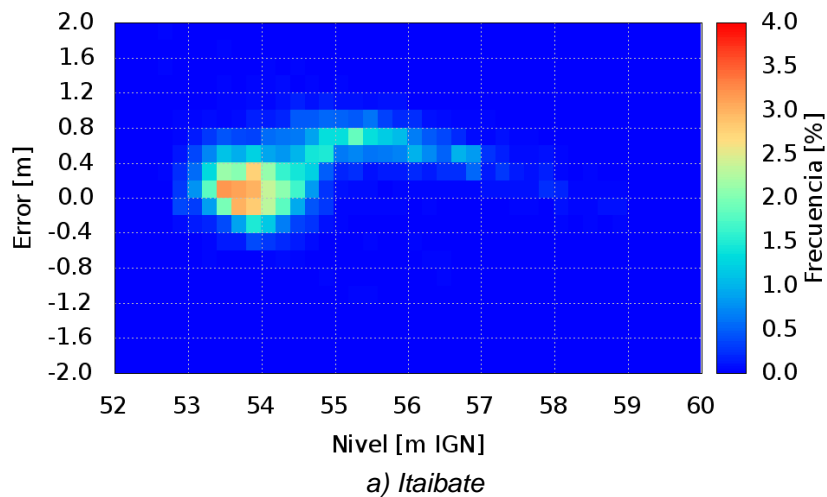
Las nubes de error muestran tres patrones de comportamiento consistentes con la distribución de las estaciones en el dominio modelado. Un primer patrón se observa en el tramo del río denominado en Argentina Alto Paraná (Itaibaté e Itatí), con nubes con una concentración importante de error alrededor del nivel medio. Para la estación Itatí se nota un importante crecimiento del error (con sentido negativo) para niveles altos del río (niveles asociados con crecidas del mismo). Esto podría indicar algún problema con la planicie de inundación, en particular que la misma este con un nivel más bajo que la real.

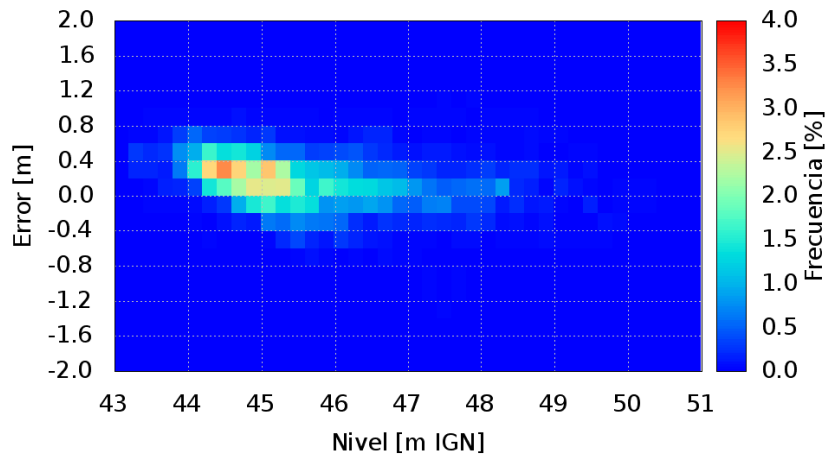
En el Paraná Medio se observa que las nubes de error se concentran sobre el nivel medio adoptando formas circulares. Se destacan los resultados de las estaciones Bella Vista y Reconquista (donde los errores tienen una marcada tendencia positiva, es decir consistentemente el modelo da niveles mayores que los observados, lo que refuerza la idea de verificar los cero de referencia de las reglas), Esquina (donde los errores tienden a ser negativos a medida que aumenta el nivel del río, indicando un problema al visto en la estación Itatí) y La Paz (cuyos errores tienen una notoria tendencia negativa)

Por último, en el Paraná Inferior (San Martín y Rosario) se presentan nubes alargadas en el sentido de la variación de niveles, demostrando una subestimación de las crecidas y una sobreestimación de las bajantes.

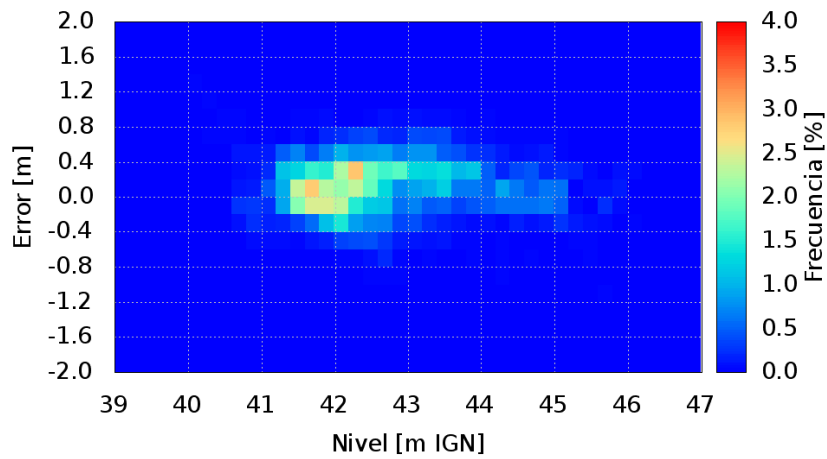
3.5.2 Superficies de frecuencia de error

Estas superficies nos muestran con qué frecuencia se presenta un determinado error para un nivel específico. Sólo se presentaran para la serie 1, dado que las demás no cuentan con la cantidad suficiente de puntos para que los valores obtenidos sean representativos

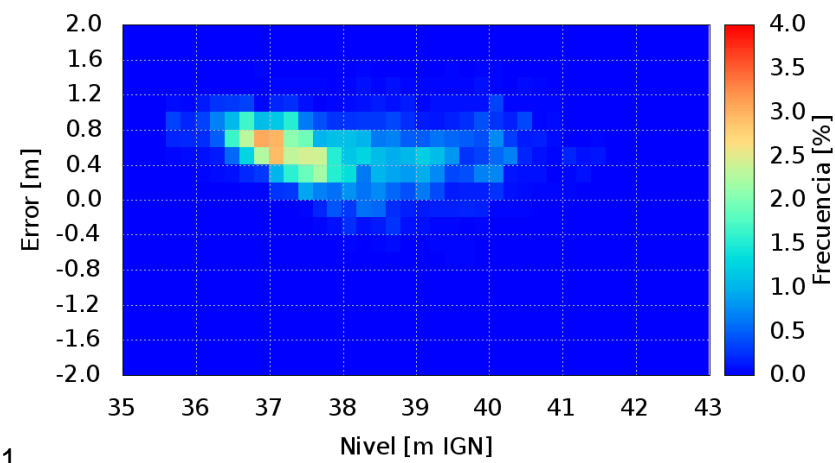




c) Corrientes

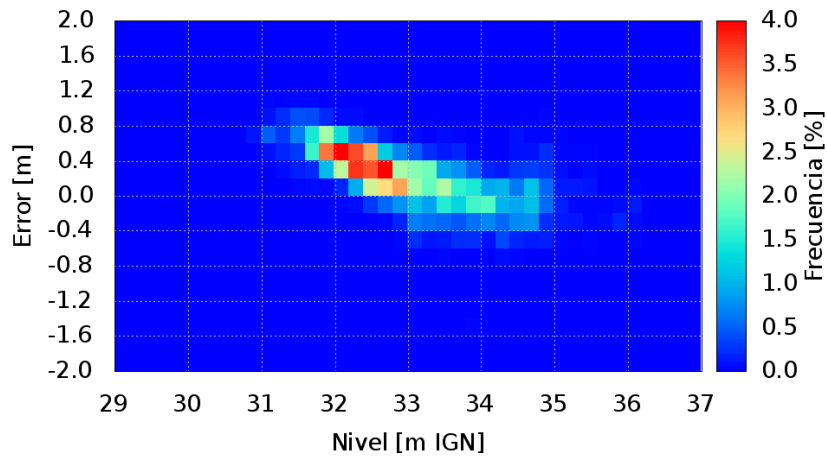


d) Empedrado

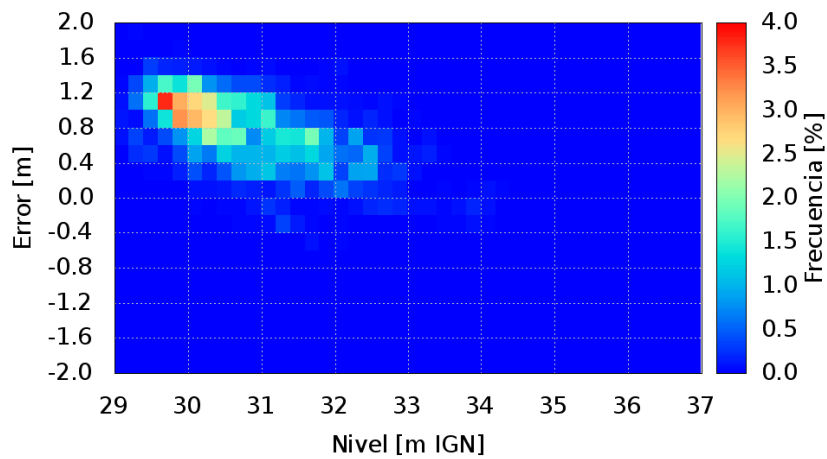


e) Bella Vista

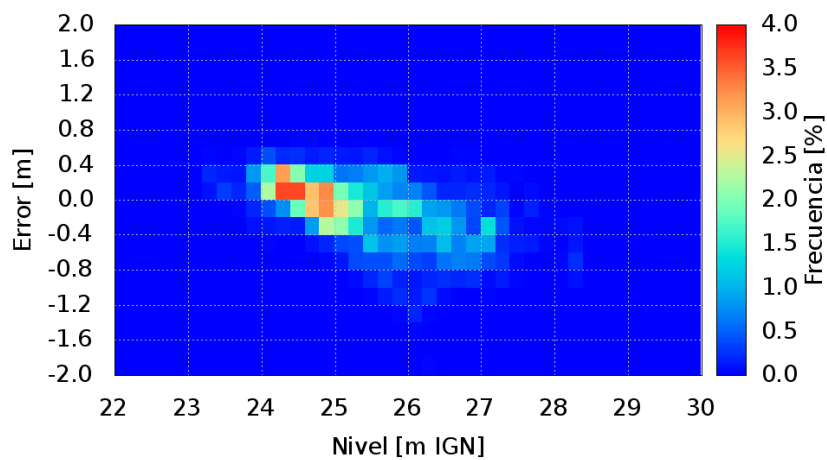
1



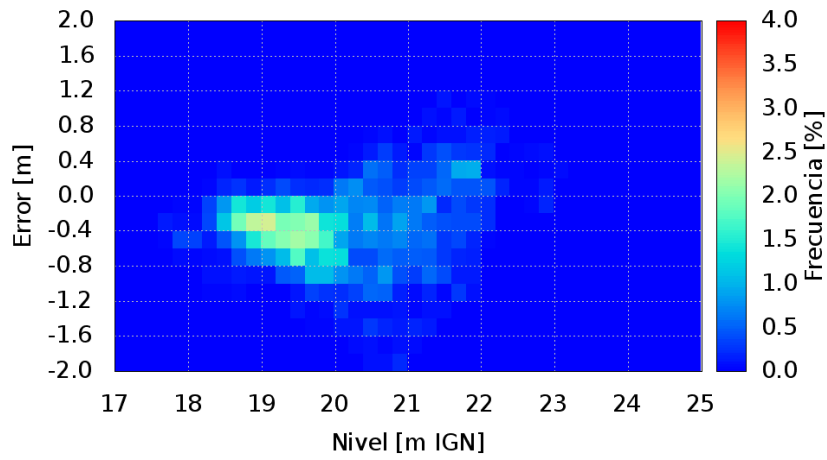
f) Goya



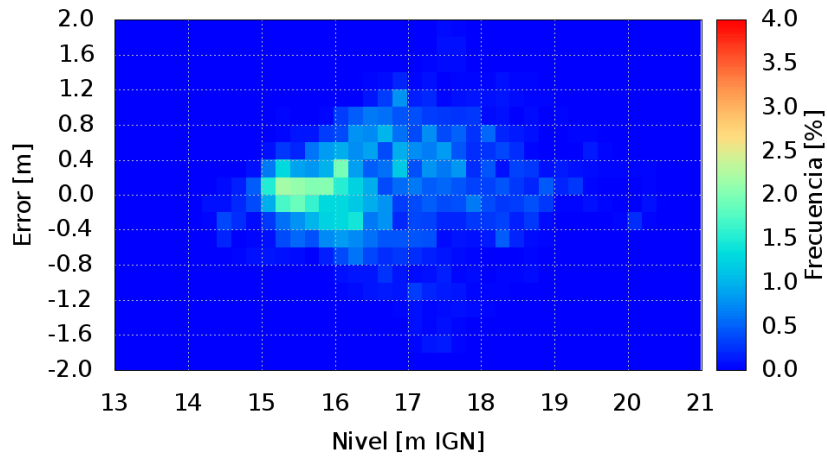
g) Reconquista



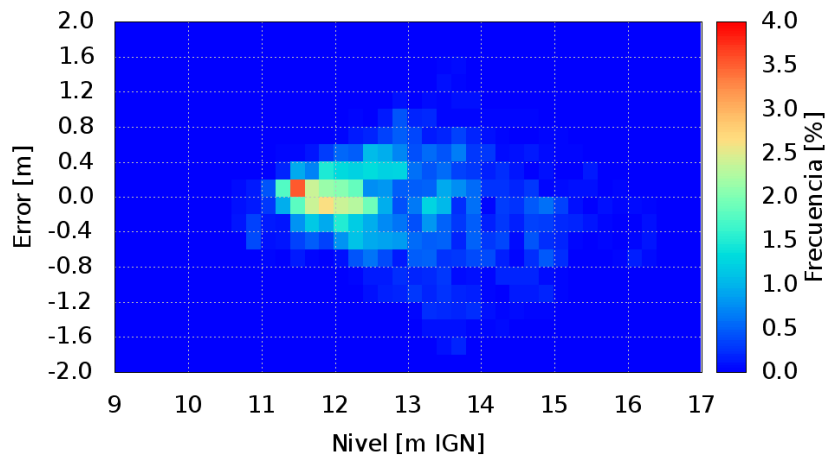
h) Esquina



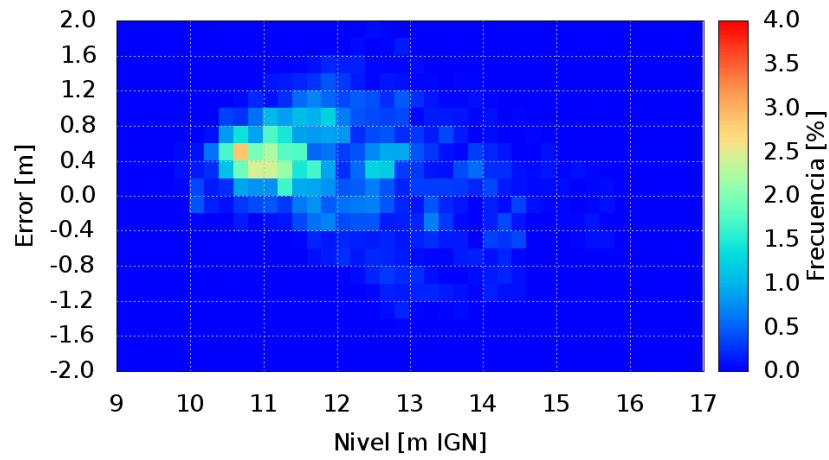
i) La Paz



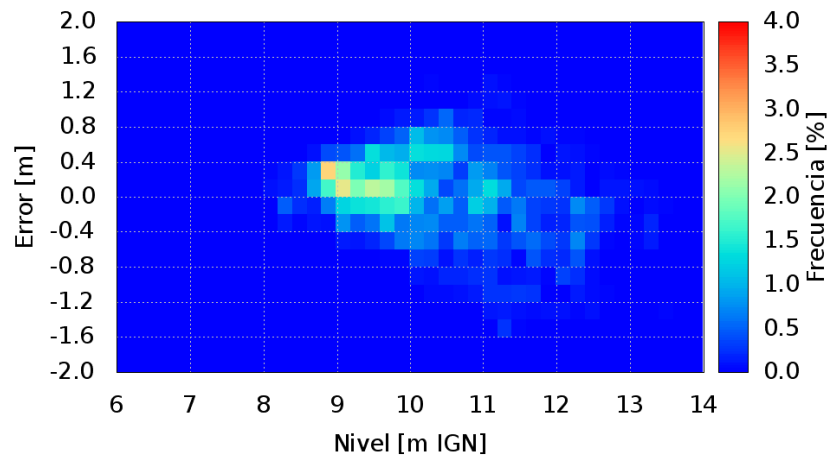
j) Hernandarias



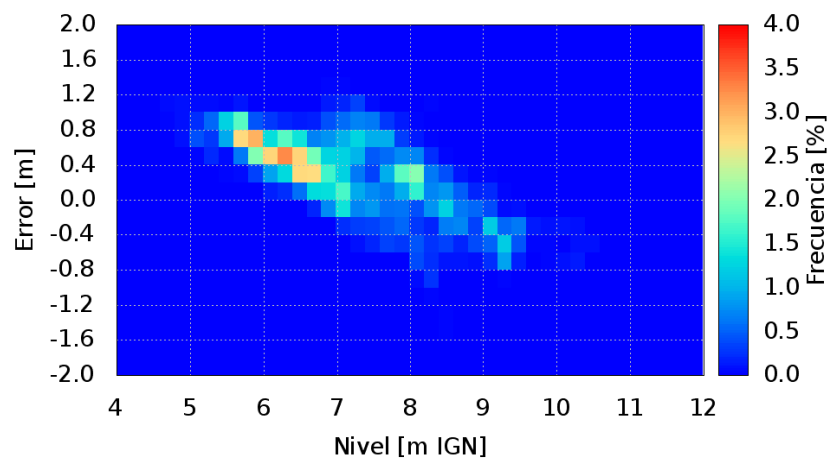
k) Paraná



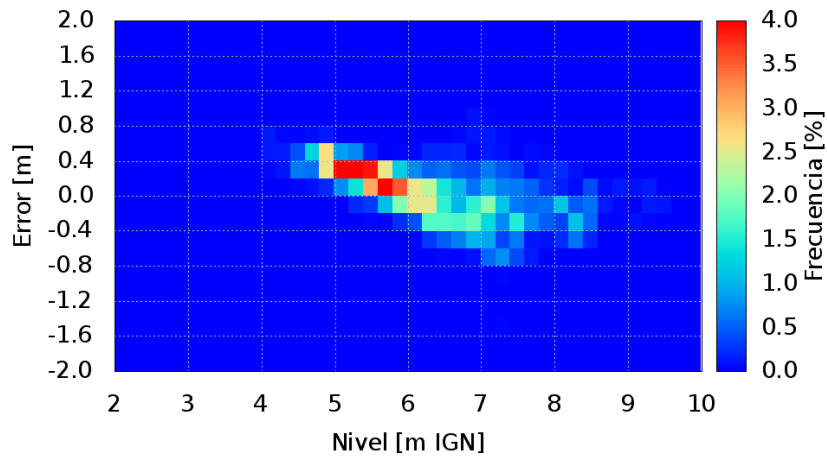
l) Santa Fe



m) Diamante



n) San Martín



ñ) Rosario

Figura 3.27. Nubes de error (Modelo 1). (simulado menos observado)

Las superficies de frecuencia de errores, presentan conclusiones similares a las obtenidas con las nubes de errores. La estación Itatí muestra un importante crecimiento del error (con sentido negativo) para niveles altos del río. Las estaciones Bella Vista y Reconquista muestran errores con marcada tendencia positiva. En Esquina los errores tienden a ser negativos. La Paz presenta errores con notoria tendencia negativa)

4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.1 Variables sensibles

El análisis de sensibilidad de un modelo consiste en perturbar los valores de determinadas variables y examinar el impacto en los resultados obtenidos. En modelos complejos, esta herramienta permite identificar los parámetros que presentan mayor sensibilidad con el objetivo de determinarlos con mayor precisión.

En el Modelo Hidrodinámico del Río Paraná, se utilizaron dos parámetros para la calibración: el coeficiente de rugosidad n de Manning y el nivel de albardones que actúa como umbral entre la sección del cauce principal y el valle de inundación. Por lo tanto, el análisis de sensibilidad se planteó sobre estos parámetros realizándose cuatro ensayos: dos de ellos variando el coeficiente n de Manning del cauce principal y dos el nivel de albardones. En el caso del Manning se modificaron los valores en $\pm 10\%$, y en el de los albardones en $\pm 0,50 m$.

Un análisis adicional se planteó para evaluar cómo impacta la evolución morfológica del río, representada a partir del cambio en una sección transversal a lo largo del tiempo, en la caracterización de los parámetros geométricos e hidráulicos de ese tramo del río. Para esto se construyeron las curvas de estos parámetros para cada fecha de relevamiento de la sección, evaluándose los cambios.

4.2 Coeficiente de rugosidad n de Manning

En la Figura 4.1 se grafican en función de la progresiva del modelo, los valores del coeficiente de rugosidad n de Manning en el cauce principal originales junto con las modificaciones para el análisis de sensibilidad (+ 10 % y - 10 %).

Para la serie completa (01/Sep/1994 al 31/Dic/2011) se calcularon los niveles medios simulados para cada estación, y se los comparó con los niveles medios simulados con el modelo modificado la variable de calibración. Los valores del nivel medio para las tres simulaciones se presentan en la Figura 4.2, mostrándose que ante cambios del orden del 10% se obtienen cambios de no más que el 5% en los niveles medios simulados. Se observa que aumentos en el coeficiente de Manning implican aumentos en los niveles simulados y viceversa.

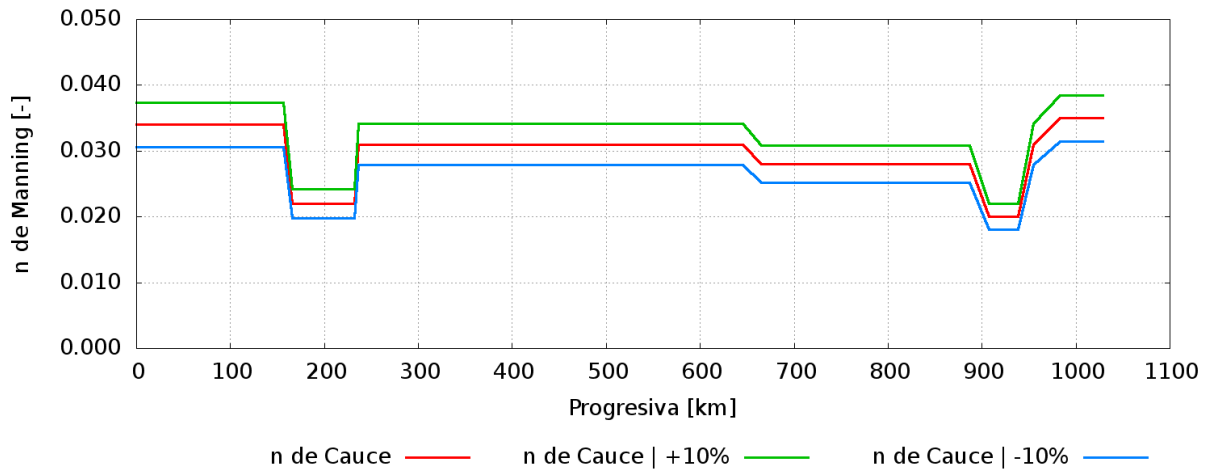


Figura 4.1. Valores del n de Manning para el análisis de sensibilidad.

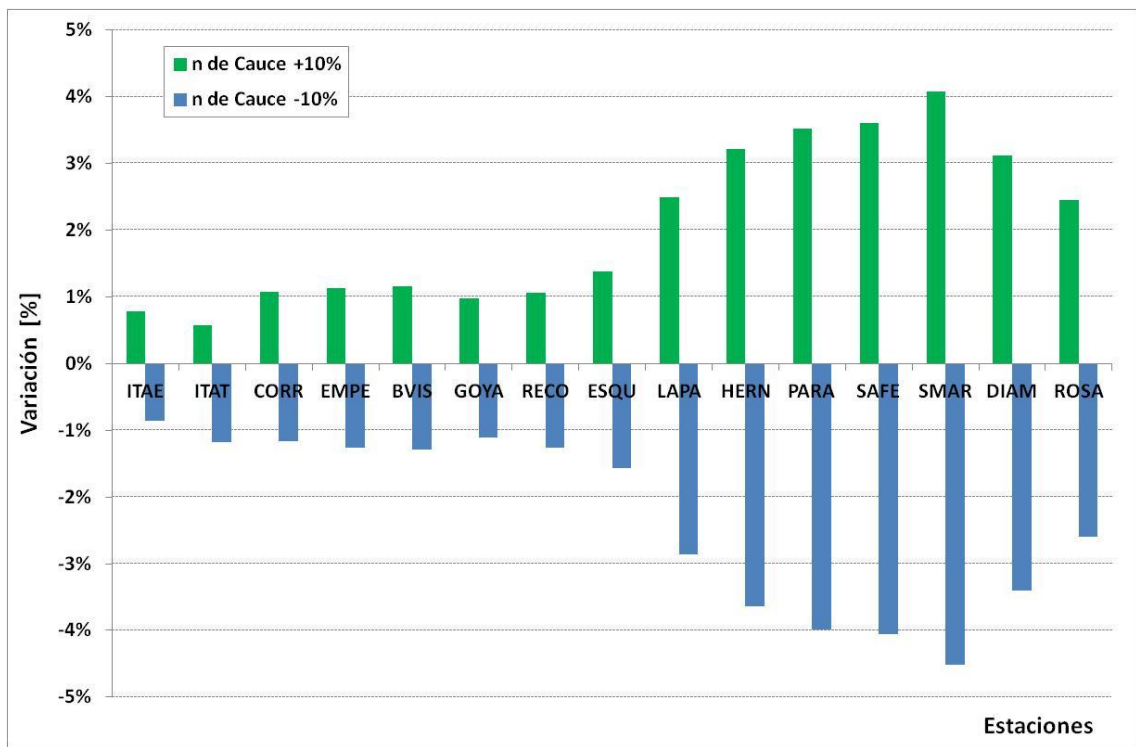


Figura 4.2. Sensibilidad del nivel medio al n de Manning.

4.3 Nivel de albardones

En la Figura 4.3 se grafican en función de la progresiva del modelo, los niveles de albardón originales junto con las modificaciones para el análisis de sensibilidad (+ 0.50 m y - 0.50 m).

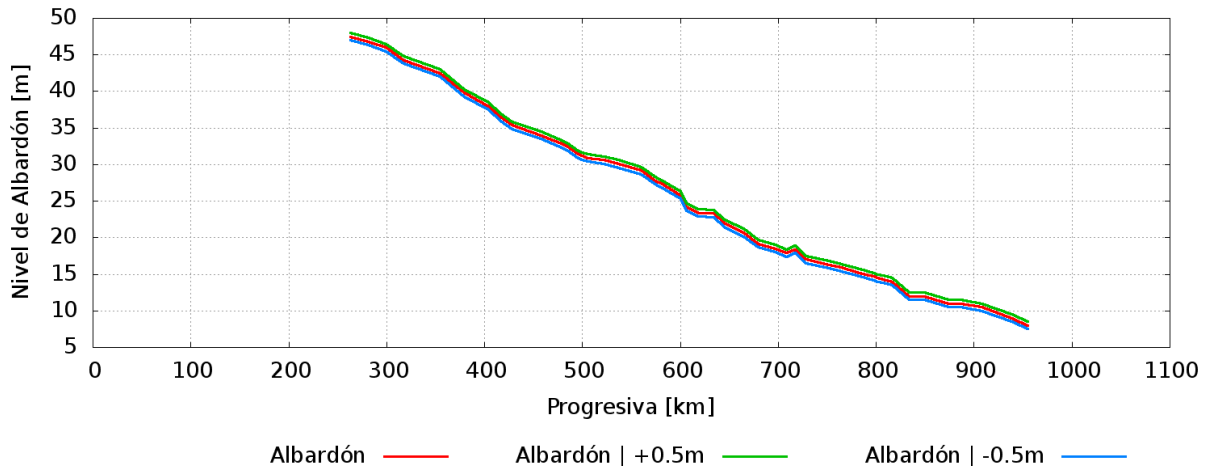


Figura 4.3. Valores del nivel de albardón para el análisis de sensibilidad.

Al igual que en la sensibilidad al Manning, se calcularon para la serie completa los niveles medios simulados para cada estación, y se los comparó con los niveles medios simulados con el modelo modificado.

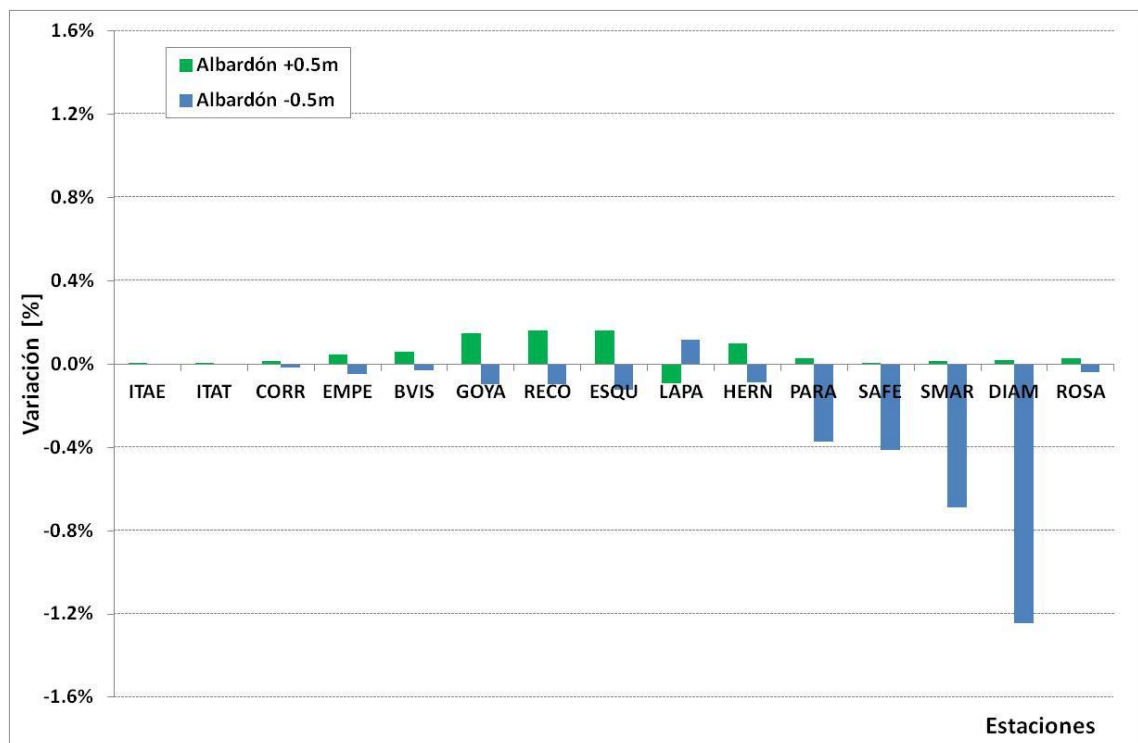


Figura 4.4. Sensibilidad del nivel medio al nivel del albardón.

El escenario resulta diferente del observado en la sensibilidad al Manning. Las variaciones en los niveles de albardones no parecen afectar de manera determinante los resultados del modelo. La variación máxima se alcanza en la estación San Martín para una reducción de 0,50 m del nivel de albardones, observándose una variación negativa de aproximadamente 1,20%.

4.4 Evolución de sección transversal en la Isla Guáscara

La morfodinámica en el Paraná Medio resulta muy activa (Ramonell et al., 2011). Las secciones transversales utilizadas en este modelo corresponden a relevamientos de la década de 1970 (Motor Columbus y Asociados, 1979). Por lo tanto, se consideró importante evaluar el impacto sobre los niveles de agua de la evolución morfológica en un tramo del dominio del modelo.

En un tramo del río Paraná, en las proximidades de las Islas Guáscara, cercana a la ciudad de Corrientes (Figura 4.5), se dispuso información sobre la sección transversal para distintas fechas (Enero 2003, Junio 2004 y Agosto 2005) (Figura 4.6). Para evaluar cómo impacta la evolución morfológica de una sección en los resultados de la modelación se realizaron tres simulaciones incorporando cada una de las secciones relevadas por la sección del modelo actual representativa de ese tramo.

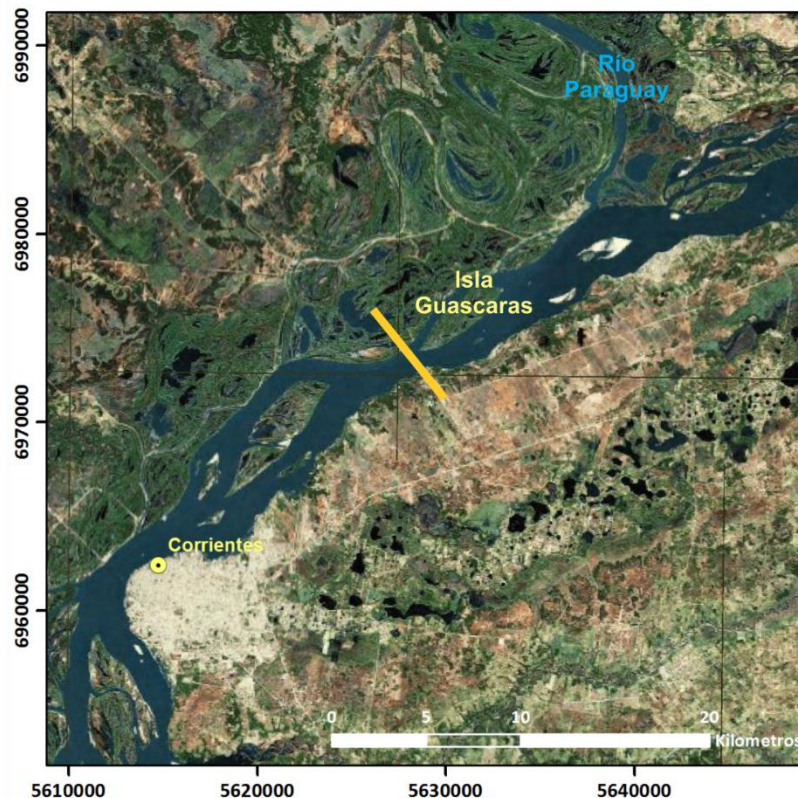


Figura 4.5. Ubicación de Isla Guáscara.

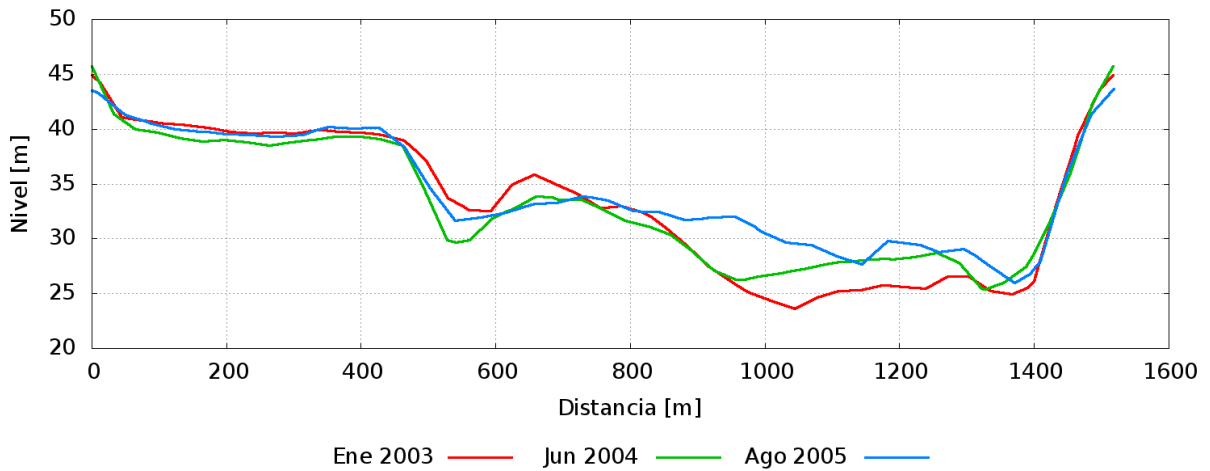


Figura 4.6. Evolución temporal de la sección transversal próxima a las Islas Guáscara.

Los relevamientos disponibles corresponden solo a la sección del cauce principal de ese tramo del río Paraná. La sección del modelo que representa la zona es la PM 99, ubicada 1.500 m aguas arriba de los relevamientos batimétricos. Dada la cercanía, para las simulaciones se reemplazaron las secciones observadas en 2003, 2004 y 2005 por la sección PM 99. A las secciones observadas se les incorporó como planicie de inundación a la propuesta en la sección PM 99 para hacer más comparable el ensayo (Figura 4.7). En la zona del cauce principal, además de mayor detalle, las nuevas secciones presentan mayor profundidad.

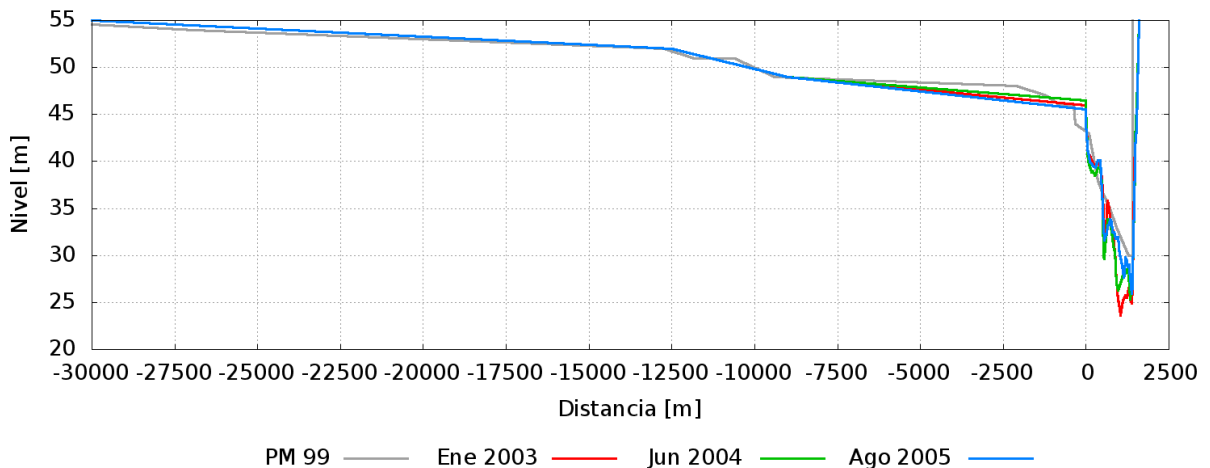
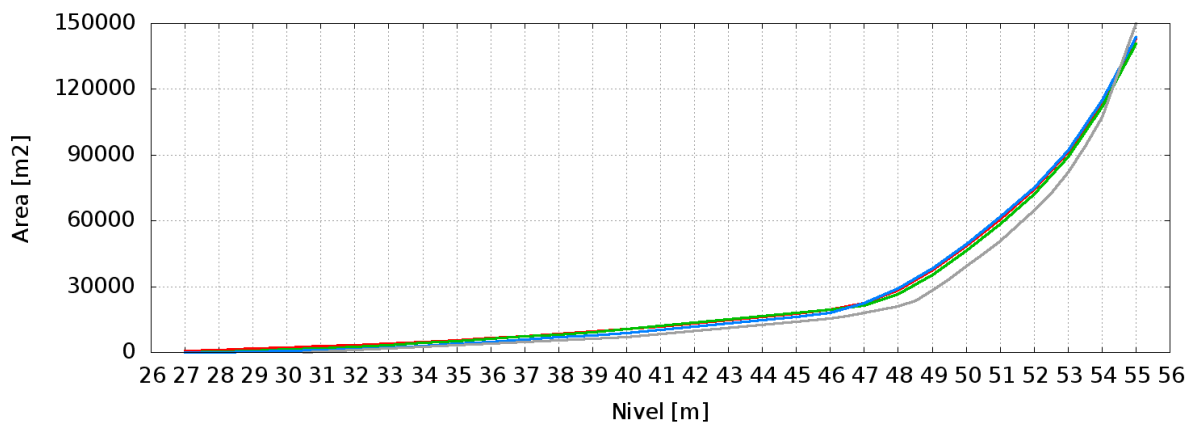


Figura 4.7. Secciones transversales utilizadas para modelación en la zona próxima a las Islas Guáscara.

Como primera aproximación a las diferencias entre las secciones observadas se estudió la variación de diversos parámetros geométricos e hidráulicos requeridos de cada sección para la modelación (área, perímetro mojado, momento areal, conductancia y ancho superficial).

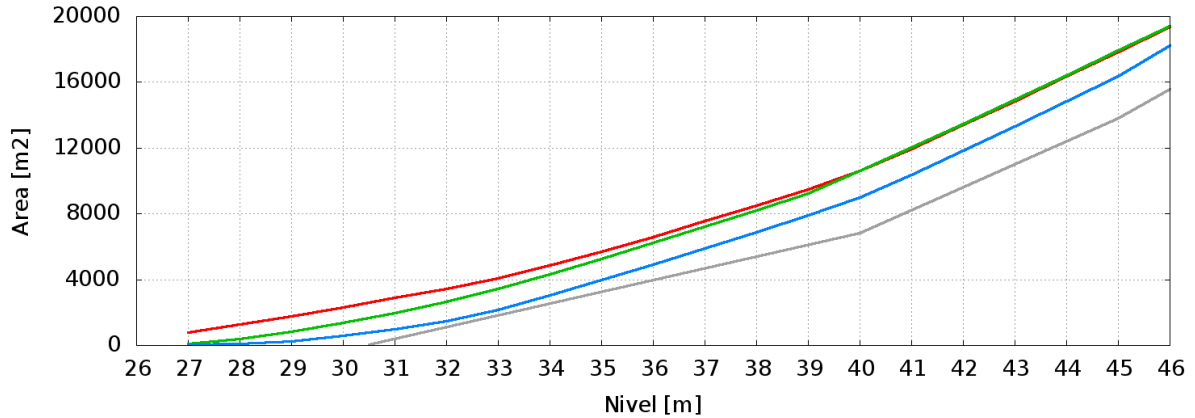
En la Figura 4.8 se compara el área en función del nivel del río. Se puede ver que las secciones más nuevas tienen mayor área que la sección que está siendo utilizada en el modelo.

Igual tipo de variación se presenta para el momento areal (Figura 4.9).



Ene 2003 — Jun 2004 — Ago 2005 — PM 99 —

a) Toda la sección.



Ene 2003 — Jun 2004 — Ago 2005 — PM 99 —

b) Cauce principal.

Figura 4.8. Evolución temporal del área de la sección transversal próxima a las Islas Guáscara.

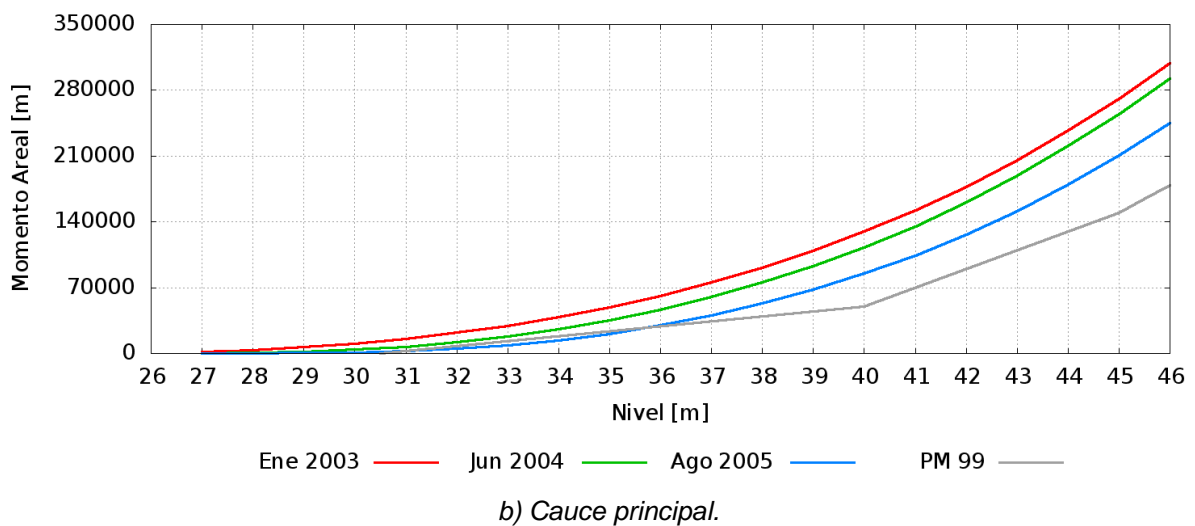
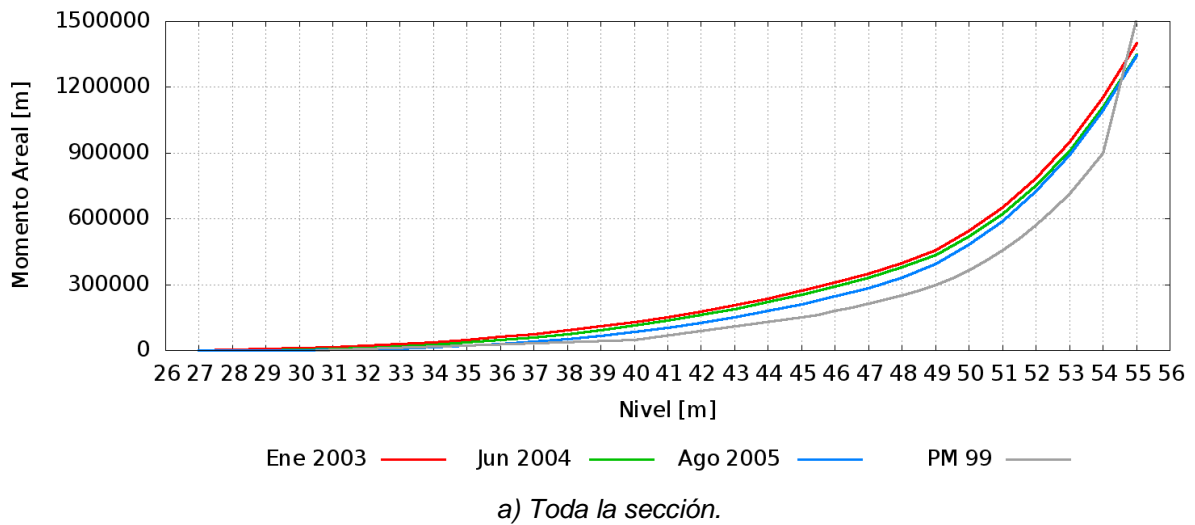


Figura 4.9. Evolución temporal del momento areal de la sección transversal próxima a las Islas Guáscara.

Mayor dispersión se da en cuanto a los valores de ancho superficial y perímetro mojado, específicamente en el cauce principal (Figuras 4.10 y 4.11).

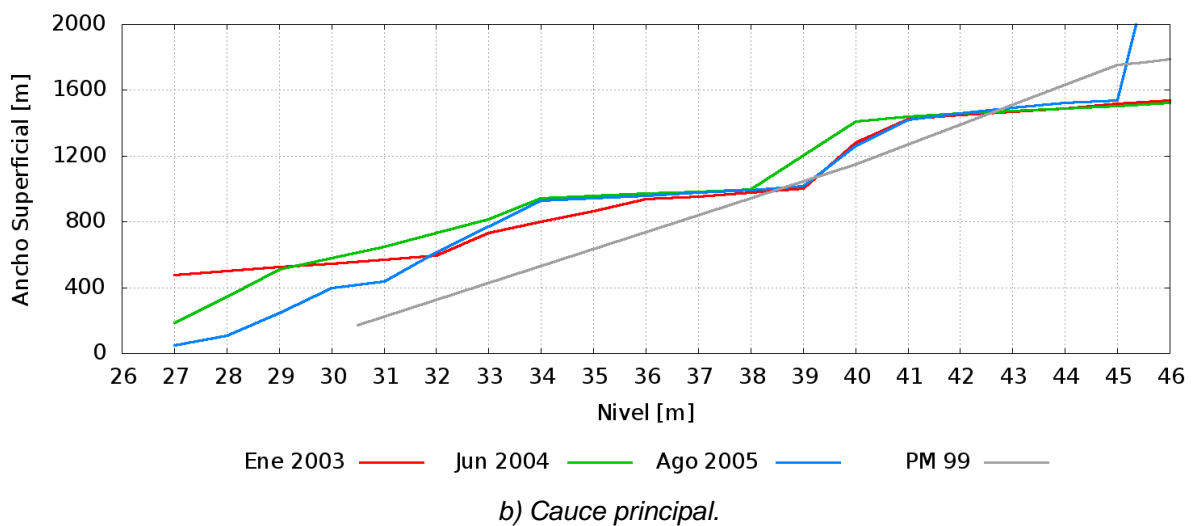
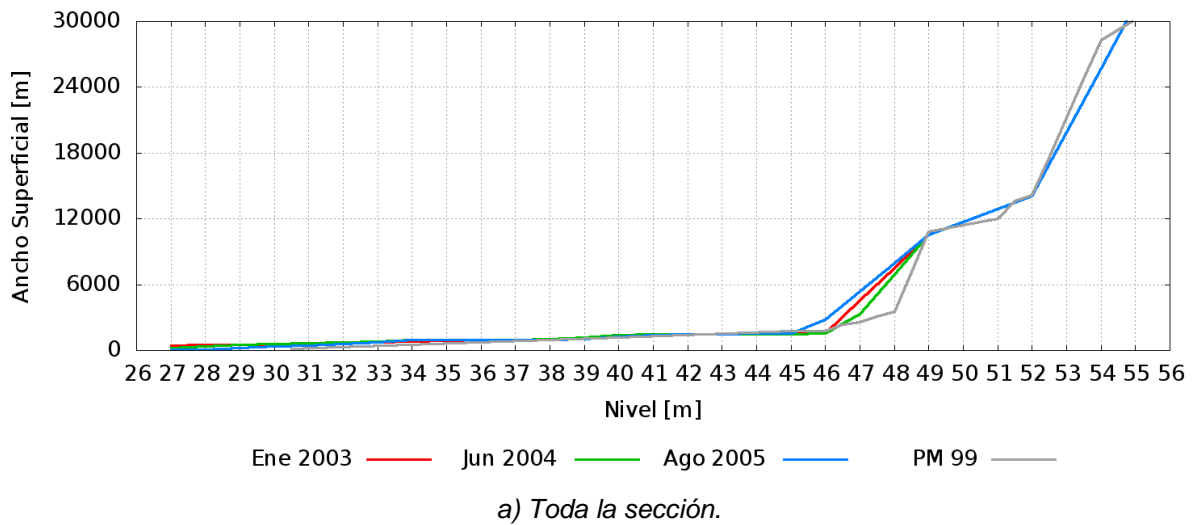


Figura 4.10. Evolución temporal del ancho superficial de la sección transversal próxima a las Islas Guáscara.

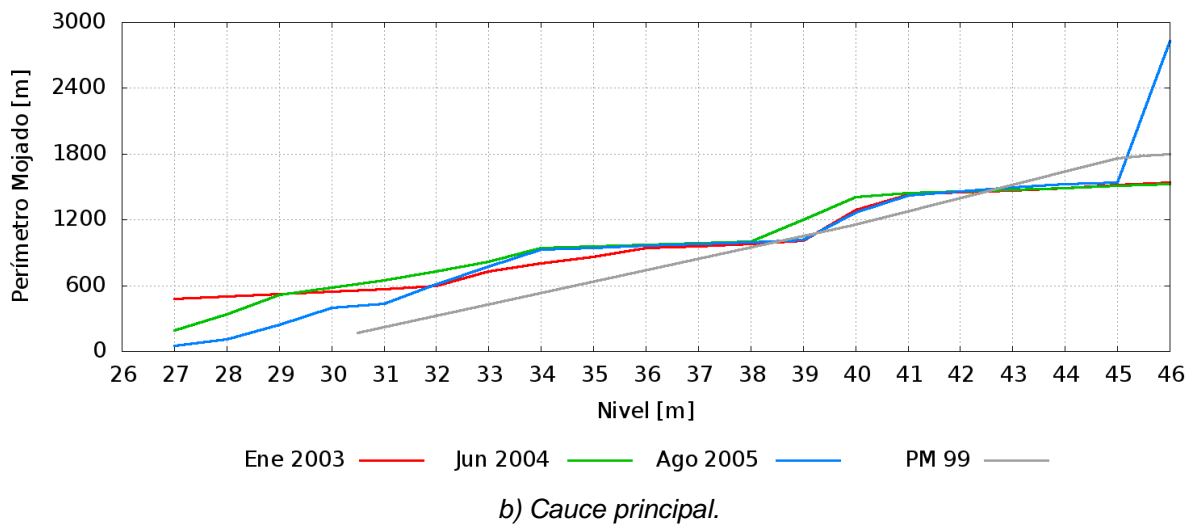
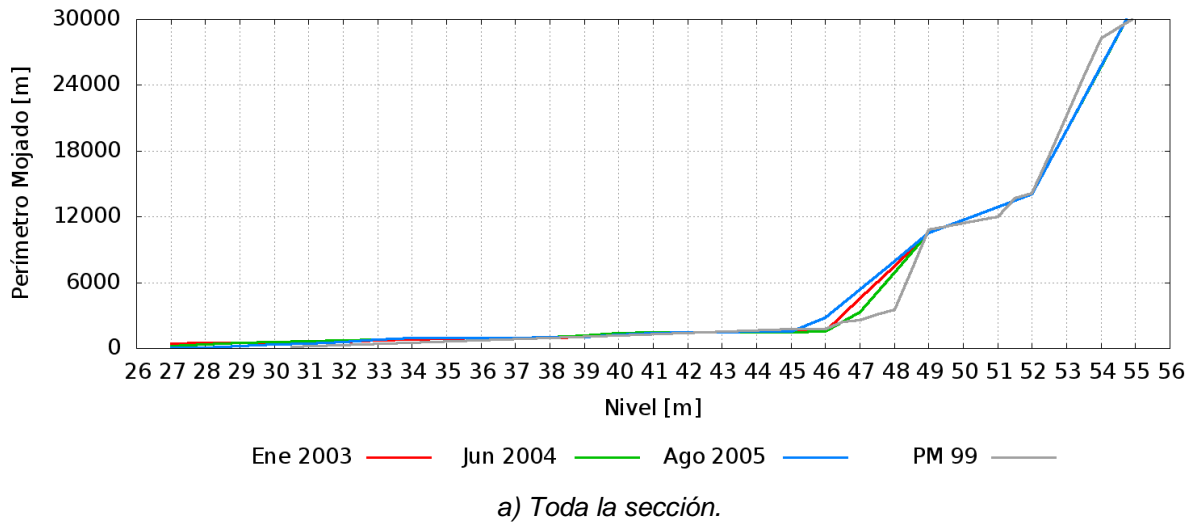


Figura 4.11. Evolución temporal del perímetro mojado de la sección transversal próxima a las Islas Guáscara.

La conductancia refleja la capacidad de transporte que tiene una sección transversal. En la Figura 4.12 se muestra la evolución de este parámetro observándose también una disminución general en las secciones modernas. Estos resultados muestran una disminución media de la conductancia en el cauce principal del orden del 25% del 2003 al 2004 y del 50% del 2003 al 2005.

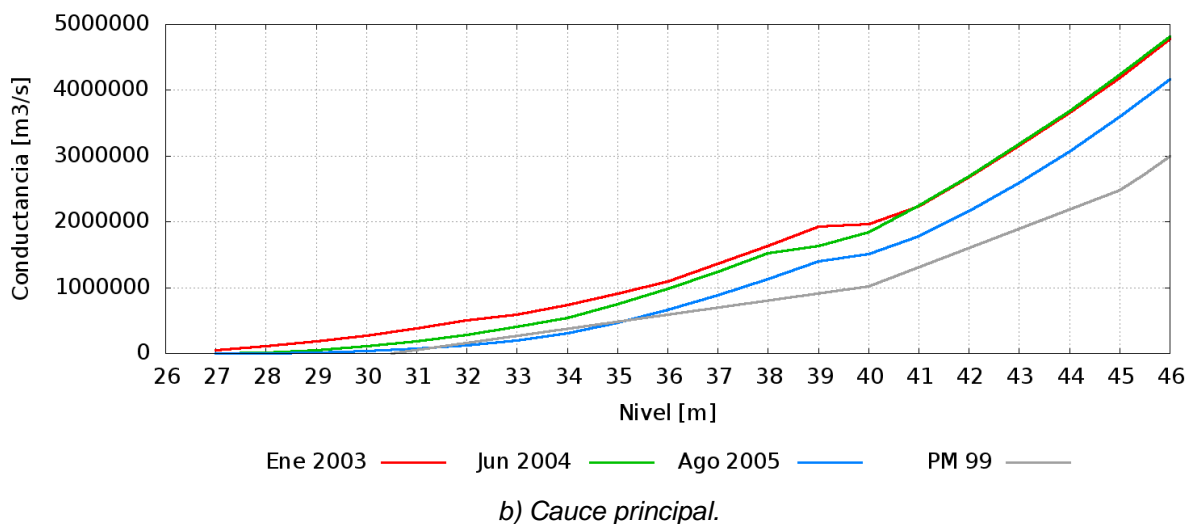
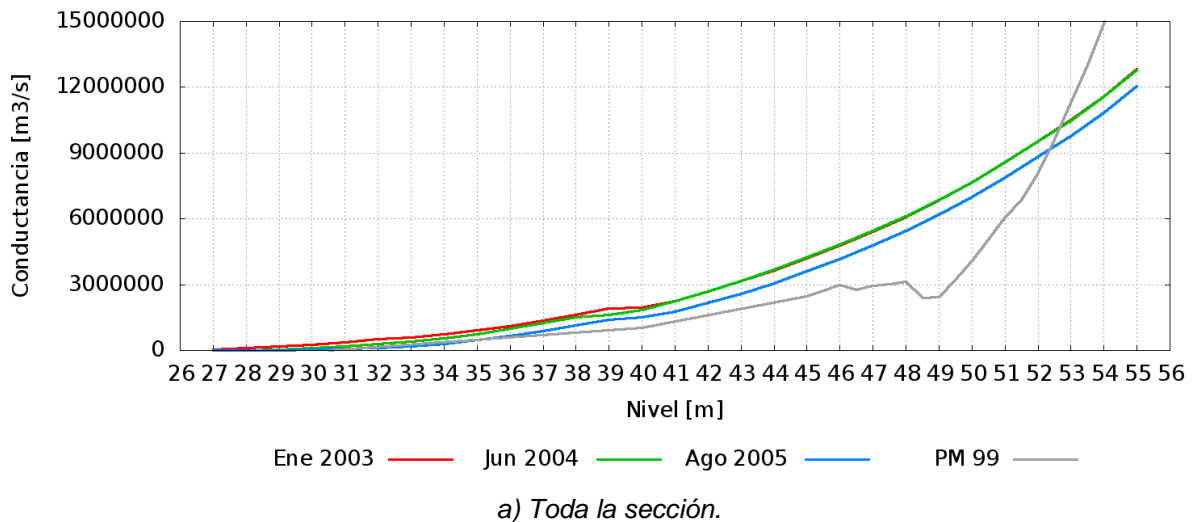


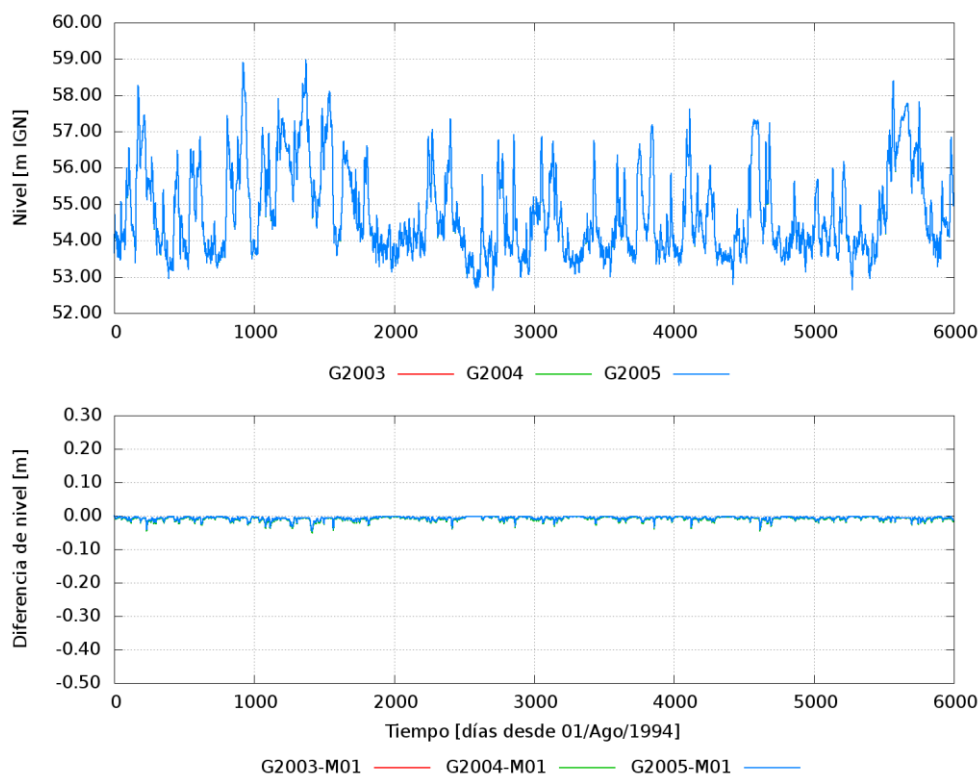
Figura 4.12. Evolución temporal de la conductancia de la sección transversal próxima a las Islas Guáscara.

Para la evaluación del impacto en los resultados de la modelación se incorporó la sección de la Isla Guáscara en el Km 214.80 del dominio. Esta sección se considera representativa de un tramo de 8 km del río ya que la sección aguas arriba (ENT-PARA,) se encuentra en el Km 207.44, mientras que la sección aguas abajo (PM 97) se encuentra en el Km 223.43.

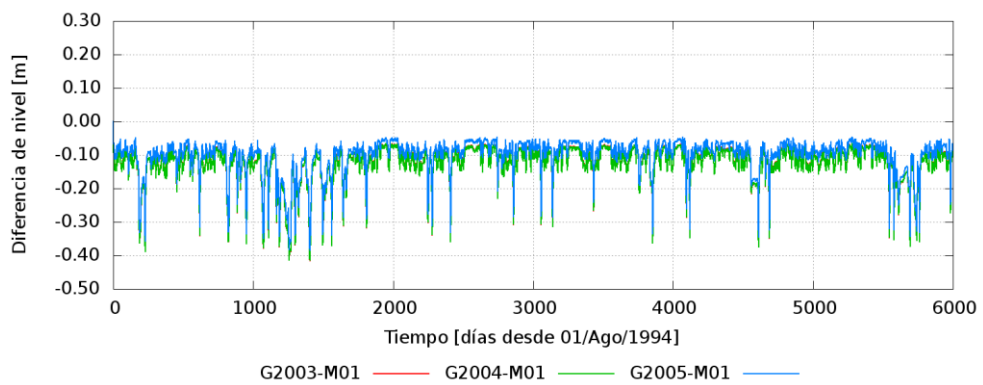
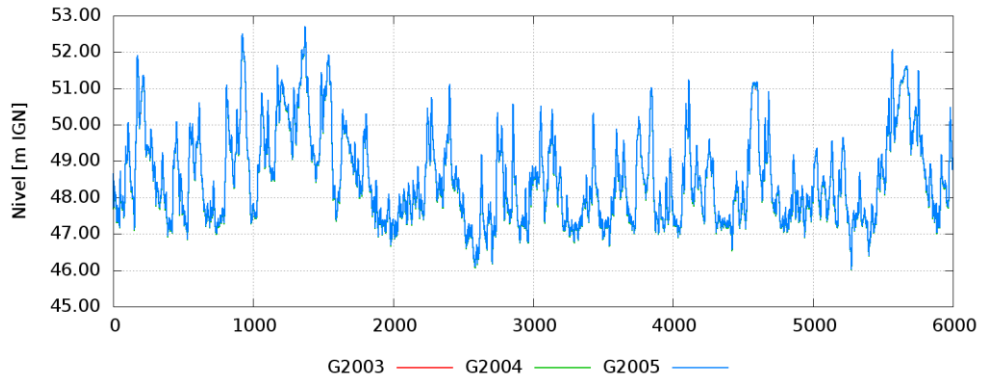
La variación de los niveles simulados respecto de la simulación con el Modelo 01 se analizó comparando los valores en dos estaciones de control de aguas arriba de este punto (Itaibate, Km 70.1, e Itati, Km 168.0) y cuatro estaciones de aguas abajo (Corrientes, Km 236.2, Empedrado, Km 296.2, Bella Vista, Km 377.9, y Goya, Km 454.8).

En la Figura 4.13 se presentan las series simuladas en cada estación de control modificando la sección de la zona de Islas Guáscara y las diferencias entre estas y la simulación con el Modelo 01. Se observa que en el contexto general la evolución de la sección del período 2003-2005 no provoca cambios significativos en los resultados de la simulación. Respecto de la sección del modelo actual se observan cambios, sobre todo durante las crecidas. Se infiere que estas diferencias se deben a la representación de la llanura de inundación.

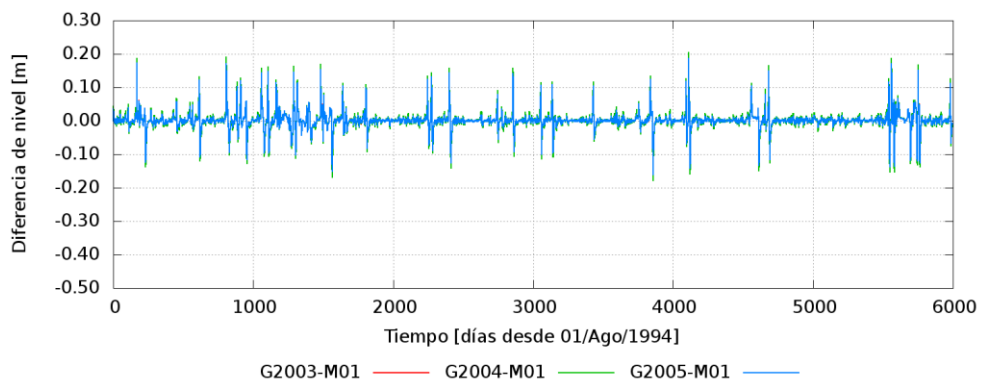
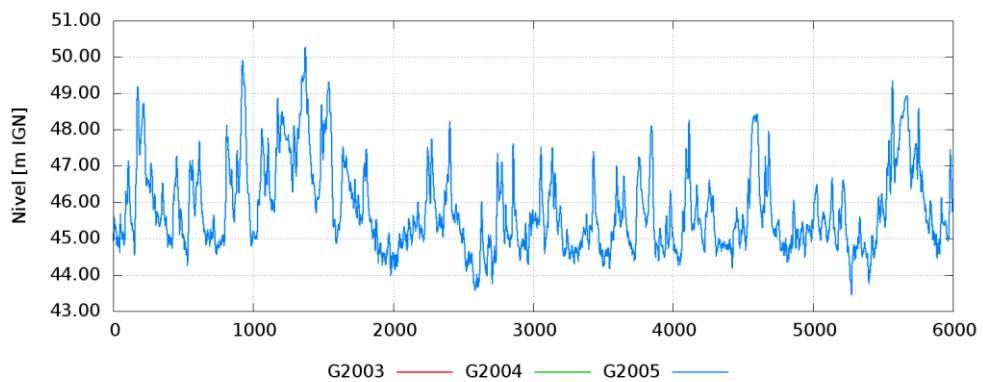
Tomando un umbral de 10 cm, se observan cambios en los niveles en un tramo de 200 km aproximadamente. Dichos cambios se propagan en mayor medida hacia aguas abajo. Sin embargo, los mayores cambios en los niveles (de 40 cm) se presentan para la estación de control (Itatí) más próxima aguas arriba de la sección modificada.



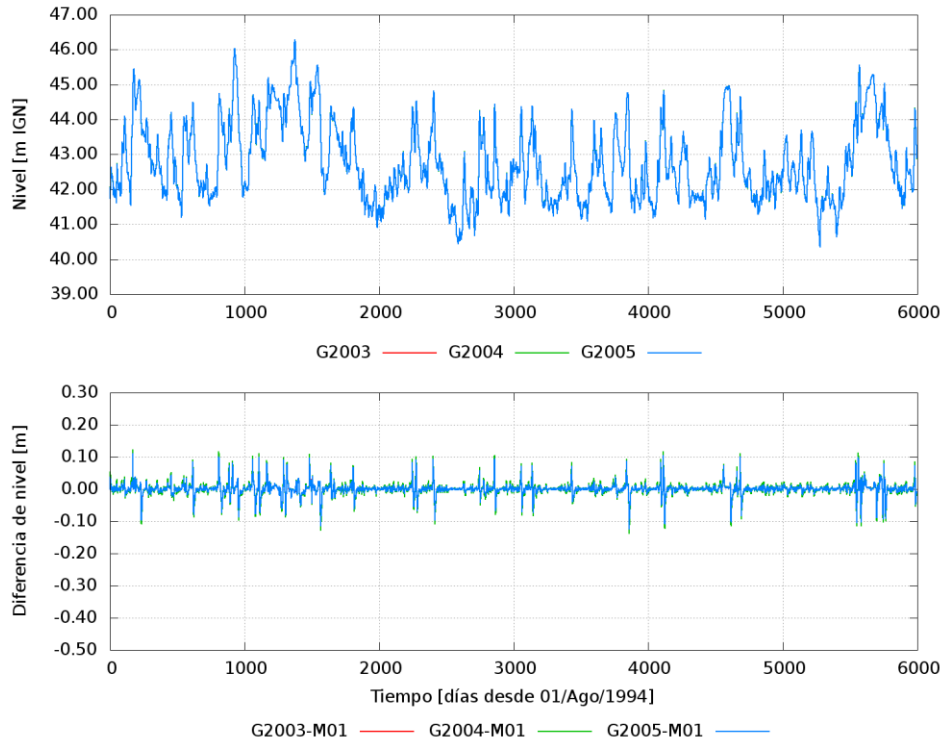
a) Itaibaté



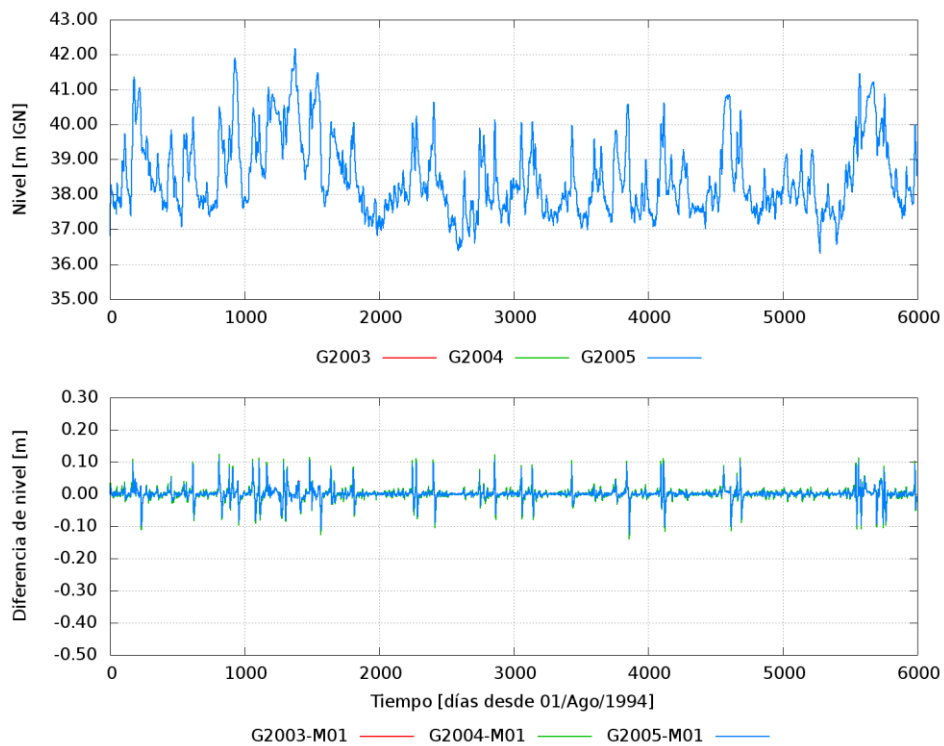
b) Itatí



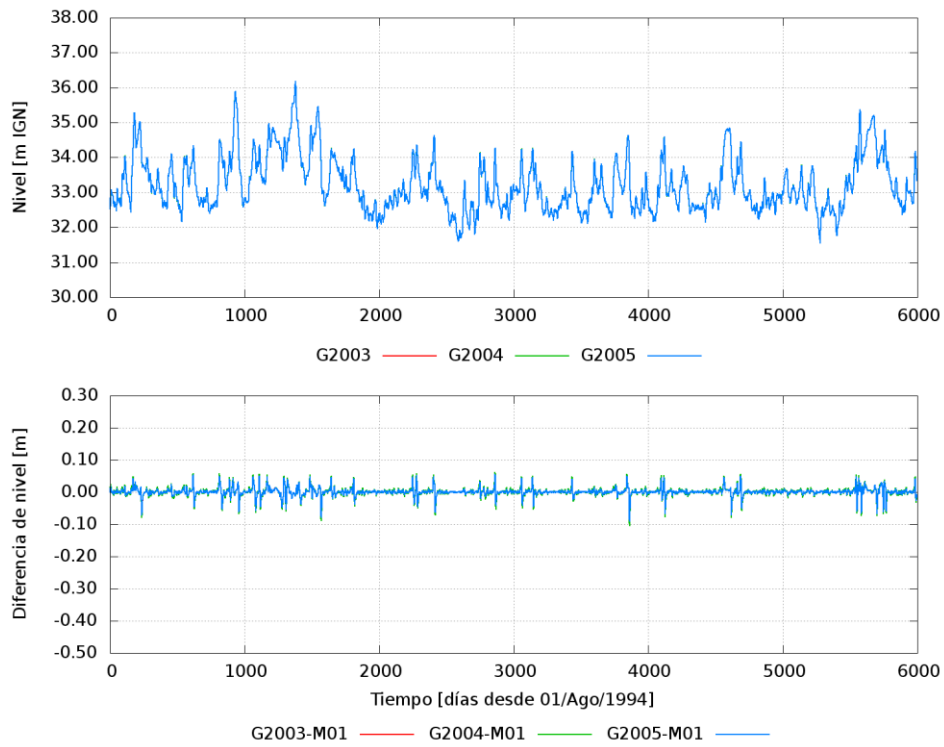
c) Corrientes



d) Empedrado



e) Bella Vista



f) Goya

Figura 4.13. Simulaciones con distintas secciones en zona Islas Guáscara.

5 CONCLUSIONES

El modelo hidrodinámico del río Paraná, tanto en su versión operativa actual (M00) como en la versión mejorada (M01), teniendo en cuenta que abraza un dominio de alrededor de 1.000 km, presenta una muy buena representación general de su dinámica en todos sus tramos. Las buenas respuestas en cuanto a pendientes y niveles medios sostienen este concepto. En este aspecto, el modelo M01 mejora la simulación respecto de la del M00.

El análisis en detalle de la performance la modelación se realizó utilizando dos tipos de abordaje: análisis estadístico de los errores y evaluación visual o gráfica. El análisis estadístico se basó en la construcción de índices en varias estaciones de control del dominio eligiendo indicadores de performance que revelan la capacidad del modelo de representar la dinámica del sistema de manera general (Error Medio, EM; Error Medio Absoluto, MAE; Raíz del Error Cuadrático Medio, RMSE; e Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe, NSEI) y que informan acerca del comportamiento puntual de la simulación (Error Mínimo, MINE; y Error Máximo, MAXE). La evaluación gráfica se planteó realizando nubes de error y superficies de frecuencia de frecuencia de error para detectar patrones de comportamiento de esta variable en cada una de las estaciones analizadas.

El error medio (EM) presenta una compensación entre diferencias positivas y negativas de la simulación con la observación, arrojando valores casi nulos en varias estaciones (es el indicador que menos información brinda acerca de la performance de la simulación). El error medio absoluto (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) tienen un comportamiento similar en todas las estaciones de control y demuestran que la magnitud de error a tener en cuenta como limitante del modelo se encuentra en el rango de 0,20 y 0,60 *m* aproximadamente. El indicador de Nash-Sutcliffe (NSEI) para las series largas muestra valores satisfactorios de ajuste entre lo observado y simulado, no haciéndolo así para el análisis de tramos de extremos (crecida y bajante).

Los errores MINE y MAXE son toman valores importantes para la serie completa simulada (de aproximadamente 0,75 a 2 *m*), pero son menores para las situaciones particulares analizadas (de aproximadamente 0,25 a 1 *m*), por lo que la ocurrencia de estos errores mayores se debe exclusivamente a desfases en el traslado de las ondas simuladas.

Los gráficos de dispersión del error, tanto las nubes como las superficies de frecuencia de error, muestran consistencia en el tipo de información que ofrecen.

Las nubes de error muestran tres patrones de comportamiento consistentes con la distribución de las estaciones en el dominio modelado. Un primer patrón se observa en el tramo del río denominado en Argentina Alto Paraná (Itaipaté e Itatí), con nubes con una concentración importante de error alrededor del nivel medio pero con la aparición de error durante crecidas. En el Paraná Medio se observa que las nubes de error se concentran sobre el nivel medio adoptando formas circulares. Y en el Paraná Inferior (San Martín y Rosario) se presentan nubes alargadas en el sentido de la variación de niveles, demostrando una subestimación de las crecidas y una sobreestimación de las bajantes. Las superficies de frecuencia de error también muestran este comportamiento pero advirtiendo que la mayor concentración se da en cercanías del nivel medio en cada estación de control.

Del análisis de sensibilidad propuesto puede verse que los ensayos realizados con los parámetros de calibración (coeficiente de Manning y niveles d albardón) no presentan un cambio significativo en los niveles del río. Por el contrario, el ensayo realizado cambiando una sección (la correspondiente a la Isla Guáscara) presenta cambios significativos en los niveles simulados, sobre todo en épocas de crecidas. Esto pone de manifiesto la necesidad de contar con información batimétrica actualizada, y con una mejor determinación de las planicies de inundación.

El principal resultado de este estudio se relaciona con la puesta en valor del modelo operativo actual para pronóstico del río Paraná. Se plantea desde este trabajo la necesidad de realizar un seguimiento exhaustivo y mantenimiento del modelo para conservar su capacidad operativa. Como actividades a realizar para mantener en buenas condiciones a este modelo operativo se sugieren las siguientes actividades:

- Actualizar la geometría con la mejor información batimétrica disponible.
- Recalibrar el modelo solo con una ventana temporal representativa del presente.
- Evaluar como entra y sale el flujo del cauce para estudiar la performance del modelo en las planicies de inundación.
- Verificar el nivel de referencia de la estación Reconquista.

REFERENCIAS

- Ahmed, F., 2010. A hydrodynamic model for the Lower Rideau River. *Natural Hazards*, 55, pp. 85-94.
- García, M.L., Basile, P.A., Riccardi, G.A., 2012a. Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de un tramo del río Paraná Inferior. IFRH 2012, 1er. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Buenos Aires, Junio.
- García, P.E., Re, M., Latessa, G., 2012b. Modelo hidrodinámico del río Paraná para pronóstico hidrológico: evaluación de performance, actualización y extensión de su aplicación. Adecuación Geométrica del Modelo, Informe LHA 01-336-12.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 1997. Modelo hidrodinámico del Río Paraná desde Yacyretá hasta la ciudad de Paraná, Informe LHA-01-165-97, Ezeiza.
- Jaime, P. R, Menéndez, A. N., Uriburu Quirno, 2000, "Modelo hidrodinámico del Río Paraná para pronóstico hidrológico", XVIII Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2000, Termas de Río Hondo.
- Krause, P., Boyle, D. P., Båse F., 2005: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, European Geosciences Union.
- Latessa G. Modelo Hidrodinámico del Río Paraná para Pronóstico Hidrológico: Evaluación de Performance y una Propuesta de Redefinición Geométrica. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. UBA-INA. 2011.
- Menéndez, A.N., Funai, R., Beirak, E., Carreras, P.E., 1987. Ezeiza IV: Un sistema computacional para el cálculo de la traslación de ondas en ríos y canales, Informe LHA-INCYTH 67-001-87. Ezeiza.
- Menéndez, A.N., 1996, Ezeiza IV: un programa computacional para redes de canales, V Congreso Argentino de mecánica Computacional, MECOM'96, San Miguel de Tucumán.
- Motor Columbus y Asociados, 1979. Estudio de crecidas de los ríos Paraná y Paraguay, Volumen 2, Buenos Aires.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual model. Part 1 – A discussion of principles, *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Nóbrega, M.T., Collischonn, W., Tucci, C.E.M., Paz, A.R., 2011. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, pp. 585–595.
- Pujol, A., Dolinkue, A.M., 1974. Modelo hidrodinámico EZEIZA III para simulación de traslación de crecidas en ríos, Informe LHA-INCYTH 14-001-74.

- Ramonell, C.G., Szupiany, R., Latrubesse, E., García, M., Pereira, M. S., Gallego, M., Marchetti, Z., Cafaro, E., Paira, A., Latosinsky, F., Bosisio, A., Torres, G., 2011. Procesos de formación del río Paraná Medio: Nuevos paradigmas para su estudio. Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, RIOS 2011, Santiago del Estero, Argentina.
- Shrestha, R.R., Nestmann, F., 2009. Physically Based and Data-Driven Models and Propagation of Input Uncertainties in River Flood Prediction. J. Hydrol. Eng., 14(12), pp. 1309–1319.