

Artículo en edición

30 intensidad para la precipitación acumulada a 3 y 24 horas. El período completo de
31 verificación considerado abarcó los años 2017-2018 y además se utilizaron técnicas
32 tradicionales de verificación (ej, Probabilidad de detección, Falsas Alarmas).

33 Adicionalmente, los pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas del WRF se
34 compararon con los del modelo global Global Forecast System (GFS). En este estudio se
35 pudo comprobar que los métodos tradicionales de verificación contribuyen a conocer la
36 calidad de un pronóstico de precipitación en forma objetiva. Por otro lado, la verificación
37 por objetos permite evaluar cómo los pronósticos logran representar la posición, tamaño e
38 intensidad del fenómeno de interés. Respecto de los modelos analizados, tanto el WRF
39 como el GFS presentan gran cantidad de eventos sorpresas y falsas alarmas, pero también
40 se destacan porque sus aciertos presentan bajos errores de posición e intensidad de
41 precipitación.

42

43 **Palabras clave:** pronósticos de precipitación, verificación espacial, MODE, WRF, GFS.

44

45

46 **SPATIAL VERIFICATION OF HIGH RESOLUTION**
47 **PRECIPITATION FORECASTS OVER SOUTHERN SOUTH**
48 **AMERICA**

49

50

ABSTRACT

51

52 Given that there is an increasing demand and use of numerical models to forecast
53 precipitation events, it is essential to advance in the use of different verification methods to
54 measure the quality of the forecasts with the evaluation of errors and biases. The method for
55 object-based diagnostic evaluation (MODE) is a spatial verification method that identifies
56 regions of interest, like precipitation, in the same way that a human would do. This method
57 defines objects in the forecast and observation fields based on user-defined parameters.
58 MODE was used to evaluate the performance of 4-km hourly precipitation forecasts from

Artículo en edición

59 the Weather and Research Forecasting Model (WRF) over southern South America against
60 the Global Precipitation Measurement (GPM) derived product IMERG Final Run version
61 (IMERG-F). For a one month period, tests were performed to select the values for threshold
62 and the radius of convolution parameters adequate for 3 and 24 hour accumulated
63 precipitation. The whole verification period considered was 2017-2018 and furthermore,
64 traditional verification statistics (eg, Probability of Detection, False Alarm Ratio) were
65 used. Additionally, 24-hour accumulated precipitation forecasts from WRF were
66 compared with those from the Global Forecast System (GFS). This study proved that
67 traditional verification methods allow objectively to know the quality of precipitation
68 forecasts. Conversely, object verification rather than making a pointwise evaluation of hits
69 and misses, identifies precipitation patterns and compares attributes describing position,
70 size and intensity of matched forecasted and observed objects. Regarding the analyzed
71 models, although WRF and GFS present many surprises and false alarms, hit events present
72 low errors associated with location and intensity of precipitation.

73

74 **Key Words:** precipitation forecast, spatial verification, MODE, WRF, GFS.

75

76 1) INTRODUCCIÓN

77

78 El pronóstico de precipitación, especialmente en los casos de precipitación intensa
79 asociados a tormentas, representa un desafío científico y tecnológico muy complejo. Uno
80 de los métodos para pronosticar su ocurrencia es la utilización de modelos numéricos de la
81 atmósfera en muy alta resolución. Debido a la importancia que conlleva el pronóstico
82 meteorológico, su verificación resulta indispensable para evaluar la calidad de los mismos.

83

84 Uno de los métodos para verificar pronósticos de precipitación es la verificación puntual,
85 en donde a partir de una evaluación punto a punto entre el campo pronosticado y observado
86 se comprueba si la precipitación ocurrió o no. Si bien el aumento de la resolución de los
87 modelos meteorológicos mejoró el rendimiento de los pronósticos, a veces este avance no

Artículo en edición

88 es captado correctamente por los métodos tradicionales de verificación que no distinguen
89 los errores asociados al desplazamiento del evento o a la extensión de la región precipitante
90 (Brown y otros, 2004; Roebber y otros, 2004; Guilleland y otros, 2020). Es así que en los
91 últimos años se desarrollaron técnicas que contemplan la verificación espacial y entre ellas
92 se encuentra el método de evaluación diagnóstica basado en objetos (MODE, por sus siglas
93 en inglés). MODE está basado en la teoría desarrollada por Davis y otros (2006a) y
94 permite, mediante resultados gráficos y estadísticos, describir y comparar los objetos
95 pronosticados con los observados (Brown y otros, 2009). Esta metodología fue utilizada en
96 diferentes partes del mundo y para diferentes aplicaciones. Mittermaier y Bullock (2013) y
97 Griffin y otros (2017) utilizaron MODE para evaluar pronósticos de cobertura nubosa. El
98 primer estudio demostró que el número de objetos en los pronósticos de nubosidad sobre el
99 Reino Unido depende de los parámetros elegidos en la verificación espacial, influyendo en
100 el número de aciertos, falsas alarmas y sorpresas. En el segundo estudio se observó que los
101 pronósticos de nubosidad en Estados Unidos son más exactos en verano ya que los objetos
102 pronosticados representan mejor la ubicación y el área de los objetos. Mittermaier y otros
103 (2020) emplearon la verificación basada en objetos para evaluar concentraciones de
104 clorofila sobre el noreste del Océano Atlántico. La metodología les permitió detectar que
105 los modelos oceánicos empleados tienden a sobreestimar la cantidad de objetos, situación
106 que podría mejorarse si se aumentara la resolución espacial de dichos modelos.

107

108 Johnson y otros (2013) compararon los resultados de la verificación por MODE entre
109 modelos con distinta resolución espacial: la mejora en la resolución de los pronósticos
110 permite encontrar objetos de menor tamaño y al igual que Kain y otros (2008), sostienen
111 que los errores espaciales de los pronósticos de mayor resolución se deben a la propia
112 resolución del modelo y a sus condiciones de borde. Wolff y otros (2014) demostraron que
113 la verificación espacial en los pronósticos de precipitación en alta resolución, a diferencia
114 de los métodos tradicionales de verificación, permite identificar errores de ubicación,
115 extensión, y desplazamiento. Moser y otros (2015) estudiaron los efectos de la asimilación
116 de datos de radar para mejorar los pronósticos de precipitación en alta resolución. Para ello,

Artículo en edición

117 MODE fue utilizado en situaciones particulares, permitiendo observar que la exactitud en la
118 predicción de la posición, área e intensidad de la precipitación varía de acuerdo al caso de
119 estudio seleccionado. Los trabajos de Johnson y otros (2013), Wolff y otros (2014) y de
120 Moser y otros (2015), coinciden en que la elección de los parámetros que definen los
121 objetos depende de cada caso de estudio, y por lo tanto la generalización de los resultados a
122 otras aplicaciones se ve limitada. Skinner y otros (2018), y posteriormente Flora y otros
123 (2019), se basaron en la técnica de MODE para verificar tormentas y mesociclones. Ambos
124 estudios señalaron la habilidad de MODE para evaluar pronósticos y que una incorrecta
125 elección del umbral de intensidad influye en el número de objetos identificados, alterando
126 los valores de los indicadores de verificación. Por su parte, Gilleland (2020) evaluó el
127 desempeño de dos nuevos índices de verificación para intensidades de precipitación de
128 modelos en alta resolución, inspirado en las propiedades de los objetos identificados por
129 MODE.

130

131 En particular en Sudamérica se pueden mencionar el trabajo de Charo y otros (2014), donde
132 aplicaron el método de MODE para estudiar un caso de precipitación intensa. En dicho
133 trabajo, MODE permite analizar desde otro punto la calidad del pronóstico de precipitación
134 ya que no solo considera la intensidad de la precipitación pronosticada, sino también el área
135 cubierta, la forma y la orientación del área. Bender y Ynoue (2014) utilizaron índices de la
136 verificación puntual y de MODE para verificar los pronósticos de precipitación del modelo
137 Global Forecast System (GFS) sobre San Pablo y alrededores. Se observó que durante la
138 época lluviosa, el GFS presenta un mejor desempeño y que gracias a la implementación de
139 MODE, pudo detectarse que una de las causas de los errores en los pronósticos se debe a la
140 sobreestimación del área y de la intensidad de precipitación. Posteriormente, Carrasco
141 (2017) avanzó en una metodología basada en MODE para evaluar la precipitación en
142 América del Sur, para lo cual se llevaron a cabo experimentos utilizando las predicciones
143 BRAMS y que fueron comparadas con las predicciones GFS. La mayor proporción de
144 errores estuvo relacionada a eventos no pronosticados y la verificación espacial resultó de
145 utilidad para caracterizar patrones espaciales.

Artículo en edición

146

147 En el presente trabajo se describe y aplica la metodología de identificación de objetos con
148 MODE, con el objetivo de realizar una verificación del desempeño de los pronósticos de
149 precipitación de alta resolución del modelo Weather Research and Forecasting Model
150 (WRF) operativo en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la región sur de
151 Sudamérica, para el periodo 2017-2018. En la sección 2 se muestran los datos y la
152 metodología empleada. En la sección 3, los resultados de la verificación para la
153 precipitación acumulada en 24 y 3 horas, y se analizan las ventajas y limitaciones de la
154 verificación puntual y de MODE. También se compara el desempeño de los pronósticos de
155 precipitación acumulada en 24 horas del WRF con los del modelo GFS. Finalmente, en la
156 sección 4 se presentan las conclusiones.

157

158 **2) DATOS Y METODOLOGÍA**

159

160 **2.1) MODELO WRF, GFS Y ESTIMACIONES SATELITALES DE** 161 **PRECIPITACIÓN**

162

163 Los pronósticos numéricos verificados son los generados para Argentina en forma
164 operativa en el SMN con el modelo WRF en su versión con núcleo dinámico Advanced
165 Research WRF (ARW) versión 3.8 (Skamarock y otros, 2005). Los pronósticos tienen una
166 resolución horizontal de 4 km y vertical de 38 niveles con el tope en 50 hPa. Su proyección
167 es Lambert Conformal y su dominio abarca toda la región sur de Sudamérica y los océanos
168 adyacentes tal como se muestra en la Figura 1. La convección se resuelve de manera
169 explícita y se generan cuatro ciclos diarios de pronósticos, inicializados a las 00, 06, 12 y
170 18 UTC, todos por un plazo de 48 horas, produciendo pronósticos en forma horaria. Los
171 mismos se inicializan a partir de los pronósticos del GFS con una resolución horizontal de
172 0.25° incorporándose como condiciones de borde en forma horaria (García Skabar y otros,
173 2018). En este trabajo, se verificaron los pronósticos del WRF inicializados a las 06 UTC
174 por un período de dos años comprendido entre el 1 de enero de 2017 hasta el 31 de

Artículo en edición

175 diciembre de 2018. Por un lado, se analizó el desempeño del pronóstico de precipitación
176 acumulada a 3 horas desde el inicio de la simulación hasta las 48 horas. Por otro lado, se
177 analizó la precipitación acumulada en 24 horas (entre las 12 UTC del día y las 12 UTC día
178 siguiente) correspondiente a un plazo de pronóstico entre 6 y 30 horas.

179

180 El GFS es un modelo meteorológico global producido por el National Centers for
181 Environmental Prediction (NCEP). Los pronósticos del GFS están disponibles con una
182 resolución espacial de 0.25° y temporal de 1 hora, con cobertura global. El GFS cuenta con
183 cuatro ciclos diarios de pronósticos (0, 06, 12 y 18 UTC), de los cuales, al igual que con el
184 WRF, se utilizó el ciclo inicializado a las 06 UTC y se analizó la precipitación acumulada
185 entre las 12 UTC del día y las 12 UTC día siguiente, correspondiente a un plazo de
186 pronóstico entre 6 y 30 horas.

187

188 Los pronósticos de precipitación del WRF y del GFS fueron comparados con las
189 estimaciones satelitales de precipitación Integrated Multi-Satellite Retrievals generadas a
190 partir de los datos provenientes de la misión de Global Precipitation Measurement, GPM,
191 en su versión Final Run (Huffman y otros, 2015), denominados IMERG-F de aquí en
192 adelante. Esta estimación cuenta con datos calibrados con estaciones pluviométricas de
193 superficie y presenta proyección regular con dominio casi global (60° N a S), resolución
194 espacial de 0.1° (equivalente a 10 km) y resolución temporal de media hora. En estudios
195 realizados para la región sur de la Cordillera de los Andes, la versión IMERG-F presentó
196 mejores resultados que otras estimaciones para casos de precipitación intensa (Hobouchian
197 y otros, 2017). Asimismo, el procesamiento adicional de IMERG-F mejora el desempeño
198 de la estimación frente a otras versiones de IMERG de menor latencia (Foelsche y
199 otros, 2017; Tan y otros, 2017; Wang y otros 2017).

200

201 **2.2) MODE**

202

Artículo en edición

203 El software Model Evaluation Tools (MET) fue desarrollado por el National Center for
204 Atmospheric Research (NCAR) con el fin de realizar verificaciones de pronósticos
205 numéricos de la atmósfera. Este software es de distribución libre y puede encontrarse en la
206 página web <http://www.dtcenter.org/met/users/>. Entre sus funciones se incluye la
207 verificación punto a punto de las variables meteorológicas, el cálculo de estadísticos
208 utilizados tradicionalmente en meteorología (por ejemplo desvío, raíz cuadrada del error
209 cuadrático medio, critical success index) y módulos de verificación espacial como la
210 verificación basada en objetos MODE, método utilizado en este trabajo (Brown y otros,
211 2009; Fowler y otros 2017). MODE considera a los objetos como regiones de interés (por
212 ejemplo, zonas de precipitación). Estos objetos se definen a partir del radio de convolución
213 (R) y el umbral de intensidad de precipitación (T). En el proceso de identificación de
214 objetos, primero se realiza un suavizado del campo original de precipitación a partir de la
215 elección de R. Cuanto mayor sea R, mayor será el suavizado y puede ocurrir que haya
216 sistemas de precipitación más pequeños que no sean identificados, prevaleciendo así los
217 objetos más grandes. Luego, se aplica una máscara con el umbral de intensidad asociado a
218 la mínima intensidad de precipitación que se desea estudiar. Para umbrales chicos, se
219 obtienen objetos de gran tamaño y a medida que aumenta el umbral, el área de los objetos
220 disminuye. Una vez aplicados R y T, se obtiene el campo final en donde se reconstruye el
221 valor original de precipitación en el interior de los objetos. En la Figura 2 se muestra a
222 modo de ejemplo, un campo de precipitación acumulada de 24 horas pronosticada por el
223 modelo correspondiente al día 19 de febrero del 2018 a las 12 UTC y los objetos
224 identificados por MODE utilizando un valor de R de 50 km y T de 10 mm.

225

226 MODE trabaja con atributos que son propiedades que caracterizan a los objetos y a partir
227 de ellos se puede indicar qué tan parecidos son los objetos identificados en el campo del
228 pronóstico y en el de la observación. Los atributos están definidos tanto para objetos
229 individuales como para pares de objetos (entre el pronóstico y la observación). En el
230 manual de MET (Foelsche y otros, 2017) se describen todos los atributos definidos por
231 MODE. En este trabajo se consideraron los atributos de pares de objetos de: la distancia

Artículo en edición

232 entre centroides, la diferencia de ángulo, la relación entre áreas y la relación entre los
233 percentiles 50 de intensidad de precipitación.

234 La diferencia entre centroides indica el error de la posición de los objetos pronosticados
235 (Figura 3.a). Si el objeto en el campo del pronóstico tiene su centro en las coordenadas $(x_1,$
236 $y_1)$ y el objeto de la observación en el punto (x_2, y_2) , entonces la distancia entre centroides
237 se calcula como:

238
$$distanciaentrecentroides = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}(1)$$

239

240 La diferencia de ángulo, asociada a la orientación de los objetos, mide las diferencias de
241 inclinación, en grados, entre los ejes de dos objetos (Figura 3.b). Al tener dos objetos, se
242 tienen dos ejes y la diferencia de ángulo es el menor de los ángulos que forman las rectas
243 cuando se cruzan.

244

245 La relación entre áreas, que se define como el cociente entre el objeto de menor área y el de
246 mayor área, indica qué tan parecidos son los tamaños de los objetos, y la relación entre el
247 percentil 50 (cociente entre el menor y mayor valor del percentil del par de objetos) mide la
248 relación de dichos percentiles de intensidad de precipitación entre los pares de objetos.

249

250 Asimismo, MODE define funciones de interés para cada atributo, considerándolos como un
251 argumento y devolviendo un valor de interés que varía entre cero y uno, siendo éste el
252 máximo grado de interés (Figura 4). La función de interés para la distancia entre centroides
253 describe que cuanto más cortas sean las distancias entre los centros de los objetos, más alto
254 será el interés. Respecto de la diferencia de orientación, si los ejes de los objetos difieren
255 entre 0° y 30° , el interés es uno y este decae a medida que la diferencia se incrementa.
256 Tanto para la relación entre áreas como percentiles de intensidad, el interés es alto para los
257 casos donde el cociente está entre 0.8 y 1, siendo 1 el caso de áreas idénticas y de igual
258 intensidad de precipitación, respectivamente.

259

Artículo en edición

260 Adicionalmente, MODE otorga un nivel de confianza a cada atributo a través de los mapas
 261 de confianza. Estos mapas toman valores entre cero y uno: el cero indica que no hay
 262 ninguna confianza mientras que el valor de uno, hay completa confianza. MODE, para los
 263 mapas de confianza de todos los atributos excepto los de la distancia entre centroides y de
 264 la diferencia de ángulo, los fija en uno. El ángulo de orientación es muy sensible a la forma
 265 del objeto. Por eso, cuanto más parecidos sean a un círculo, más bajo será el nivel de
 266 confianza. Respecto de la distancia entre centroides, su mapa de confianza depende de la
 267 relación entre las áreas de los objetos y los pares de objetos con áreas diferentes entre sí
 268 tienen bajo nivel de confianza.

269
 270 Luego, a cada atributo se le asigna un peso que puede ser modificado por el usuario. En
 271 este trabajo se utilizaron los pesos por defecto, siendo los atributos asociados a distancias
 272 los que presentan mayor importancia. Los pesos asignados fueron: 2 para la distancia entre
 273 centroides, 1 para la diferencia de ángulo y para la relación entre áreas, y 0 para la relación
 274 entre los percentiles 50 de intensidad de precipitación.

275
 276 A partir de las funciones de interés, mapas de confianza y pesos relativos de cada atributo,
 277 se define el interés total entre pares de objetos (I):

278
 279
$$I = \frac{\sum_{i=1}^n w_i A_i B_i}{\sum_{i=1}^n w_i A_i} \quad (2)$$

280
 281 en donde i representa cada atributo, w_i los pesos relativos, A_i los mapas de confianza y B_i ,
 282 las funciones de interés. El interés total también varía entre cero y uno, siendo uno el valor
 283 que indica la máxima relación entre los objetos. En MODE, se debe fijar un umbral para
 284 dicho interés ya que los objetos que tengan un valor mayor o igual al umbral fijado serán
 285 vinculados si pertenecen a distintos campos (es decir un objeto del pronóstico y uno de la
 286 observación) o fusionados si pertenecen al mismo campo. En este trabajo, se fijó el umbral
 287 de interés total en 0.7 al igual que en la mayor parte de los trabajos que utilizan esta

Artículo en edición

288 metodología (Davis y otros, 2009; Clark y otros, 2012; Bender y Ynoue, 2014; Yan y
289 Gallus, 2016).

290

291 También puede definirse la máxima distancia posible que debe existir entre los centroides
292 del par de objetos. Eligiendo un adecuado valor para esta distancia, el tiempo de ejecución
293 de MODE se reduce significativamente, evitando las comparaciones entre objetos muy
294 distantes, como por ejemplo un objeto del pronóstico de la región del norte argentino con
295 uno de la observación de la región patagónica. En este trabajo, la máxima distancia
296 permitida es de 400 km.

297

298 Finalmente, se definen los conjuntos en cada campo, formados por la agrupación de objetos
299 vinculados y/o fusionados. En la lógica de MODE, primero se identifican los objetos
300 vinculados entre los campos observados y pronosticados, y a partir de esta selección se
301 fusionan los objetos dentro de un mismo campo, observado o pronosticado. Es así que un
302 conjunto puede estar formado por un objeto en cada campo, o por varios objetos. En la
303 Figura 5 se muestran dos ejemplos. El par-conjunto 1 está formado por un objeto
304 perteneciente al pronóstico y otro a la observación, en cambio el par-conjunto 2 está
305 formado por 4 objetos en el campo del pronóstico y 1 objeto en el campo de la observación.
306 En el par-conjunto 2, los 4 objetos del pronóstico se fusionaron porque cada uno de ellos
307 fue vinculado con el único objeto del campo de IMERG-F. Al igual que los objetos, los
308 conjuntos son caracterizados por sus atributos.

309

310 **2.3) ELECCIÓN DE RADIOS DE CONVOLUCIÓN Y UMBRALES DE** 311 **INTENSIDAD**

312

313 Para determinar los valores del suavizado y de los umbrales de precipitación, que fueran
314 adecuados para la verificación de precipitación, se realizaron varios experimentos con
315 diferentes combinaciones de R y T para los pronósticos del WRF inicializados a las 06
316 UTC para el mes de febrero del 2018.

Artículo en edición

317 Para la precipitación acumulada en 24 horas, en base a una evaluación cualitativa de los
318 resultados y a la experiencia de trabajos previos en otras regiones (Davis y otros, 2006a;
319 Davis y otros, 2009; Johnson y Wang, 2012a; Bender y Ynoue, 2014; Clark y otros, 2014;
320 Yang y Gallus, 2016), se analizaron en mayor detalle las combinaciones de radios de 50 y
321 100 km, con umbrales de precipitación mayores a 1 y 10 mm.

322

323 La Figura 6 muestra el ejemplo de un pronóstico de precipitación acumulada de 24 horas
324 entre las 12 UTC del 18 y las 12 UTC del 19 de febrero de 2018. Se observa que al
325 aumentar el umbral de precipitación disminuye el tamaño de los objetos,
326 independientemente del suavizado elegido. Un umbral superior a 10 mm en 24 horas está
327 asociado a sistemas que perduran en el tiempo o sistemas de precipitación intensa. En las
328 áreas de precipitación diaria mayores a 1 mm, al ser un umbral muy bajo para ese intervalo
329 de tiempo, los objetos, y por consiguiente los conjuntos, están asociados a la presencia o no
330 de precipitación. Por otro lado, si bien IMERG-F obtiene mejores resultados que otras
331 estimaciones, la detección de precipitación con umbrales tan bajos sigue siendo sensible y
332 varía de acuerdo al umbral seleccionado (Tan y otros, 2017), impactando en el resultado de
333 la verificación de los modelos. También se observa que los conjuntos con bajos valores de
334 R son más parecidos al campo original y a medida que aumenta el radio de convolución,
335 estos se suavizan más, es decir tienen menos detalle, o incluso no se identifican como
336 ocurre con los conjuntos para una tasa de precipitación igual o superior a 10 mm, en el
337 centro y norte del país.

338

339 Además, la Tabla I muestra la cantidad de objetos vinculados (los que forman parte de
340 algún conjunto) para el mes de febrero del 2018, según los parámetros elegidos. Se puede
341 observar que a medida que aumenta el umbral de precipitación, disminuye la cantidad de
342 objetos vinculados y al aumentar el radio de convolución, se produce el mismo efecto.

343

344 Al analizar los resultados de las distintas combinaciones entre los parámetros de R y T se
345 pudo ver que por un lado, cuanto mayor es el suavizado menor es la definición o el detalle

Artículo en edición

346 de los conjuntos; por otro lado, al aumentar el umbral de precipitación menor es el número
347 de conjuntos ya que la búsqueda de objetos está centrada en encontrar áreas con
348 precipitación intensa. También, a medida que el umbral aumenta, el tamaño de los
349 conjuntos disminuye. Por ende si se eligieran bajos valores de R y T, MODE encontrará
350 mayor cantidad de objetos y el área de los conjuntos será grande, mientras que para altos
351 valores de R y T, se obtendrán menos objetos y de menor tamaño.

352

353 Debido a la importancia de los pronósticos de precipitación intensa asociada a tormentas y
354 por qué una buena predicción puede ser significativa para los tomadores de decisiones o
355 para usuarios en general, se tomó la decisión de aplicar la identificación de objetos para
356 sistemas precipitantes más desarrollados. Por dicha razón se eligió trabajar con un
357 suavizado de 50 km y con precipitación acumulada mayor o igual a 10 mm cada 24 horas.
358 Para la precipitación acumulada cada 3 horas, luego de un análisis cualitativo y tomando
359 como referencia los trabajos de Davis y otros (2006a), Wolff y otros (2014), y de Yan y
360 Gallus (2016), se consideró el radio de convolución de 50 km y el umbral de intensidad de
361 3 mm.

362

363 **2.4) ESQUEMA DE VERIFICACIÓN**

364

365 Dado que los pronósticos y las estimaciones de precipitación tienen retículas distintas y de
366 diferente resolución espacial, para realizar la comparación se decidió interpolar la
367 información de los pronósticos del WRF y del GFS a la retícula de IMERG-F. MET tiene
368 definido algunos métodos para realizar la interpolación horizontal y para este caso se utilizó
369 el método bilineal, el cual considera los cuatro puntos de retícula más cercanos al punto que
370 se desea interpolar (Davis y otros, 2009; Johnson y otros, 2013; Carrasco, 2017). De esta
371 forma, al interpolar el campo del WRF al de la estimación, se degradó su resolución
372 horizontal de 4 km a 10 km, mientras que para el caso del GFS, este pasó de 25 km (0.25°)
373 a 10 km.

374

Artículo en edición

375 Para la verificación espacial se utilizaron los atributos de los pares de conjuntos de
 376 distancia entre centroides, diferencia de ángulo, relación entre el percentil 50 de intensidad,
 377 relación entre áreas y el interés total. Respecto de las medidas de verificación puntual, se
 378 realizaron tablas de contingencia para un determinado umbral de precipitación a partir de
 379 las cuales se calcularon los índices BIAS Score, la probabilidad de detección (POD), la
 380 relación de falsas alarmas (FAR) y el índice Equitable Threat Score(ETS).

381

$$382 \quad \text{BIASScore} = \frac{H+F}{H+M} (3)$$

$$383 \quad \text{POD} = \frac{H}{H+M} (4)$$

$$384 \quad \text{FAR} = \frac{F}{F+H} (5)$$

$$385 \quad \text{ETS} = \frac{H-C}{H+F+M-C}, \text{ con } C = \frac{(H+F).(H+M)}{H+F+M+CN} \quad (6)$$

386

387 en donde H son los aciertos, F las falsas alarmas, M sorpresas y CN los correctos negativos.
 388 Valores de BIAS Score cercanos a 1 indican un buen desempeño del modelo, valores por
 389 encima de 1 indican una sobreestimación de la cantidad de eventos de precipitación
 390 pronosticados y valores menores a 1 indican una subestimación. POD varía de 0 a 1, siendo
 391 un pronóstico perfecto aquel cuyo valor sea 1. El FAR que representa las falsas alarmas
 392 también varía entre 0 y 1, siendo un pronóstico perfecto cuando vale 0. El ETS está
 393 asociado a los eventos correctamente pronosticados, considerando los aciertos aleatorios y
 394 sus valores varían entre -1/3 y 1: un pronóstico perfecto tendrá un valor de ETS igual a 1.
 395 Un mayor detalle de estos estadísticos y su definición se puede encontrar en
 396 <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> y en Nurmi (2003).

397

398 **3) RESULTADOS**

399

400 **3.1) PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN 24 HORAS**

401 **3.1.1) Verificación de pronósticos de precipitación del WRF**

402

Artículo en edición

403 Para la verificación puntual y considerando el umbral de 10 mm, se calcularon los valores
404 medios de los índices BIAS Score, POD, FAR y ETS de los pronósticos de precipitación
405 del WRF (Tabla II) para el período 2017-2018. Si bien el BIAS Score es cercano a 1, los
406 valores de POD y ETS son bajos por lo que el modelo tiene un bajo desempeño para
407 pronosticar correctamente los eventos de precipitación para un umbral de 10mm. Además,
408 el índice FAR evidencia la presencia de falsas alarmas. Estos resultados son similares a los
409 encontrados en la verificación del sistema de pronóstico operativo implementado en el
410 SMN para el año 2020 frente a observaciones de estaciones convencionales (Matsudo y
411 otros, 2021). Asimismo, los resultados de los índices POD, ETS y FAR pueden estar
412 influenciados por la doble penalización de la verificación punto a punto (Zingerle, C., y
413 Nurmi, P., 2008). Primero, porque en la comparación puntual, en el campo de la
414 observación se observa precipitación pero no así en el campo del pronóstico (evento
415 sorpresa) que detecta la precipitación con un pequeño desplazamiento en otra posición.
416 Segundo, porque esa precipitación en el campo del pronóstico resulta a la vez ser una falsa
417 alarma ya que en la retícula de la observación, no se observaron valores de precipitación
418 acumulada. Esta doble penalización es más notable cuanto mayor es la resolución espacial
419 del pronóstico, y por estos motivos resulta conveniente recurrir a metodologías de
420 verificación espacial para validar pronósticos en alta resolución (Roebber y otros, 2004;
421 Rossa y otros, 2008).

422

423 Para analizar el desempeño del WRF en los casos de aciertos, a partir de la verificación
424 espacial, se realizaron histogramas de frecuencia relativa de algunos atributos de los pares
425 de conjuntos, como se muestra en la Figura 7. En este análisis no fueron considerados los
426 objetos sorpresas y falsas alarmas, es decir que se descartaron aquellos objetos con interés
427 total del par pronóstico-observación menor a 0.7 (que representan más del 50% del total de
428 los objetos identificados por MODE). De esta forma, solo se analizaron los objetos que
429 cumplen con un radio de convolución de 50 km, un umbral de intensidad mayor o igual a
430 10 mm y con el interés total entre pares mayor o igual a 0.7. En la Figura 7 se observa que
431 para el par conjunto pronóstico-observación, las distancias más frecuentes son las que se

Artículo en edición

432 hallan entre 40 y 120 km. También se observa que dominan los casos con diferencia de
433 orientación menor a 10° . Las funciones de interés de estos atributos (Figura 4) muestran
434 que cuanto más bajos sean sus valores, más alto será el interés, lo que implica que el WRF
435 presenta un buen desempeño para pronosticar la posición de la precipitación. El histograma
436 del percentil 50 de intensidad de precipitación muestra frecuencias altas para valores de
437 relación mayor a 0.8, indicando que el WRF presenta pocos errores en los pronósticos de
438 intensidad de precipitación. Respecto de la relación entre áreas, la distribución de
439 frecuencias es homogénea por lo que la habilidad del WRF para pronosticar el área de la
440 precipitación es baja.

441

442 Por otro lado, pudo corroborarse que dominan los pares de conjuntos, entre el campo del
443 WRF y de IMERG-F, que presentan intersección entre sus áreas. Sin embargo, existen
444 algunos pocos casos (que representan sólo el 5%) en los cuales el interés total resulta mayor
445 a 0.7 y no existe área de intersección, es decir que la posición de la región precipitante
446 pronosticada no concuerda con la observada. En estos casos, el WRF pronostica la
447 precipitación con un leve desplazamiento respecto de la precipitación observada, pero la
448 forma y orientación de la misma es similar a la observada.

449

450 El histograma de interés total (Figura 8) condensa la información de los atributos vistos
451 anteriormente. Se observa que el modelo presenta altos valores de interés con los conjuntos
452 asociados al campo de IMERG-F, dominando los pares de conjuntos con un interés total
453 superior a 0.95. Esto se debe principalmente a que gran parte de los conjuntos identificados
454 por MODE presentan distancias cortas entre sus centroides, con poca diferencia entre sus
455 ejes de inclinación y un buen pronóstico de intensidad de precipitación.

456

457 **3.1.2) Comparación de pronósticos de precipitación del WRF y del GFS**

458

459 Comparando los resultados entre el WRF y GFS de la verificación puntual de los
460 pronósticos de precipitación acumulada mayor o igual a 10 mm en 24 horas, la Tabla II

Artículo en edición

461 muestra bajos valores de POD y ETS, indicando que ambos modelos presentan dificultades
462 para pronosticar correctamente los eventos de precipitación. Respecto del BIAS Score, se
463 observa que el GFS tiende a sobreestimar los eventos de precipitación. La Tabla III
464 presenta los estadísticos para verano e invierno, tomando el verano como los meses de
465 diciembre, enero y febrero y el invierno como junio, julio y agosto. Comparando los
466 valores medios de POD, FAR y ETS entre estaciones, se observa que los pronósticos de
467 eventos de precipitación de ambos modelos mejoran levemente durante el invierno (que es
468 la época menos lluviosa), aunque los índices POD y ETS permanecen bajos y los valores
469 del FAR indican un número importante de falsas alarmas.

470

471 Como resultado de la verificación espacial y a partir del análisis diario, se obtuvieron los
472 diagramas de cajas de la frecuencia diaria de objetos que cumplen con un radio de 50 km y
473 un umbral de intensidad de 10 mm en los campos del WRF, GFS e IMERG-F, y de los
474 objetos vinculados con un interés total mayor o igual a 0.7 (Vin.WRF y Vin.GFS) para los
475 meses de verano e invierno (Figura 9.a y 9.b, respectivamente). Se observa que en verano
476 se encuentra un mayor número de objetos que en invierno, tanto en los campos
477 pronosticados como en los observados, coincidiendo con la climatología que indica que en
478 la mayor parte del país, en verano se registra la mayor frecuencia de eventos de
479 precipitación (Marino, 2007; Salio y otros, 2007). En verano (Figura 9.a), la mediana de los
480 objetos encontrados diariamente en los campos del WRF y de la estimación satelital tiene
481 un valor de 13 objetos mientras que para el GFS presenta 10 objetos, indicando una
482 subestimación de los eventos de precipitación pronosticados por este modelo. En invierno
483 (Figura 9.b) también se observa una subestimación de eventos en el GFS.

484

485 Los objetos vinculados son los objetos asociados entre el campo del pronóstico y de la
486 estimación satelital, con un interés total igual o superior a 0.7, y que forman parte de algún
487 conjunto. Respecto de los vinculados diariamente por MODE en el periodo de estudio, se
488 observa que la proporción de objetos vinculados disminuye respecto del número total de
489 objetos (Figura 9 y Tabla IV). Esto se debe a que MODE compara un objeto del campo de

Artículo en edición

490 pronóstico con un objeto de IMERG-F, siempre que la distancia entre centroides sea menor
491 o igual a 400 km, ocurren varios casos en donde los atributos del par son bajos y en
492 consecuencia se obtiene un interés total menor a 0.7. Esta situación ocurre por 3 posibles
493 causas: 1) cuando MODE busca comparar un objeto del campo del pronóstico que no está
494 presente en el campo observado (Falsa Alarma), 2) cuando MODE busca comparar un
495 objeto del campo observado que no está presente en el campo pronosticado (Sorpresa) , y 3)
496 cuando los centros de los objetos están muy separados o sus atributos no son lo
497 suficientemente similares. Es así que se obtiene una disminución en la frecuencia de
498 ocurrencia de los objetos vinculados con respecto a las ocurrencias de objetos individuales
499 del WRF y GFS: en verano este valor desciende a 5 eventos diarios y en invierno, se
500 detectan entre 2 y 3. Además, tanto en invierno como en verano, son más los objetos
501 vinculados en promedio en el caso del WRF que en el GFS, indicando un mejor desempeño
502 del WRF en la verificación espacial de los sistemas precipitantes.

503

504 Para continuar con el análisis y comparación de la verificación espacial de ambos modelos,
505 se realizaron los histogramas de frecuencia relativa de la distancia entre centroides, la
506 relación entre áreas y el interés total, para verano e invierno, de los pares de conjuntos con
507 un interés mayor o igual a 0.7. Al igual que en la sección 3.1.1, los conjuntos se formaron a
508 partir de los objetos vinculados, representando entre el 43% y 52% de los objetos totales,
509 según el modelo y la época del año (Tabla IV). En los histogramas de la distancia entre los
510 centros de los conjuntos (Figura 10.a y 10.b), se observa el dominio de casos en donde la
511 distancia entre los centros se encuentra entre 40 y 120 km y que la frecuencia de pares de
512 conjuntos con distancias menores a 40 km es mayor en el WRF que en el GFS. Los
513 histogramas de la relación entre áreas (Figura 10.c y 10.d) se caracterizan por su
514 homogeneidad, demostrando la poca eficacia de los modelos para pronosticar la extensión
515 de la precipitación. Por último, se observa que tanto el WRF como el GFS presentan altos
516 valores de interés con los conjuntos asociados al campo de IMERG-F (Figura 10.e y 10.f).
517 Esto se debe principalmente a que gran parte de los conjuntos identificados por MODE
518 presentan distancias cortas entre sus centroides. Además, se observa que la cantidad de

Artículo en edición

519 casos con interés total entre 0.95 y 1 es superior durante el invierno, resultado influenciado
520 por la mejora de los modelos al pronosticar la relación entre áreas de los sistemas
521 precipitantes.

522

523 **3.2)PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN 3 HORAS**

524

525 Los valores medios de los índices estadísticos del BIAS Score, POD, FAR y ETS con un
526 umbral de intensidad de 3 mm, para la verificación de los pronósticos de precipitación
527 acumulada de 3 horas del WRF desde su inicio hasta las 48 horas, se muestran en la Figura
528 11. Se puede ver que el pronóstico no tiene un buen desempeño en las primeras 3 horas a
529 excepción de las falsas alarmas que presenta una reducción. Esto es producto del período de
530 spin up del pronóstico dado que la convección se resuelve en forma explícita requiriendo
531 más tiempo para el desarrollo de la precipitación (Done y otros, 2004). Se observa también
532 que los valores de POD y ETS tienden a disminuir de acuerdo avanza el plazo del
533 pronóstico, y en el caso del FAR, estos empiezan a aumentar. En otras palabras, como es de
534 esperar a medida que aumenta el plazo del pronóstico, este se vuelve menos preciso.
535 Además, los valores de los estadísticos en el análisis de la precipitación acumulada en 24
536 horas, resultaron mejores. En los pronósticos de precipitación acumulada cada 3 horas, al
537 aumentar la resolución temporal se acentúa el efecto de la doble penalización en los índices
538 de verificación puntual, ya que a los errores en los desplazamientos espaciales se les suma
539 los errores asociados a pequeños desfases en el tiempo, por ejemplo, diferencias en el
540 tiempo de inicio y finalización del evento.

541

542 Por otro lado, también se evidencia que las curvas del BIAS Score, POD y ETS presentan
543 dos máximos (Figura 11), vinculados a la precipitación acumulada entre las 9 y 12 UTC.
544 Analizando el ciclo diario de la tasa de precipitación acumulada cada 3 horas estimada por
545 IMERG-F, se puede observar una relación entre la tasa de precipitación y los valores de los
546 índices estadísticos. En horas de la mañana se produce la menor tasa de precipitación en la
547 región de estudio, por lo que los máximos del BIAS se relacionan con la sobreestimación

Artículo en edición

548 de los eventos de precipitación por parte del WRF. Asimismo, la mejora en los valores del
549 POD y ETS, se observan también en las horas de mínima tasa de precipitación estimada por
550 IMERG-F.

551

552 Considerando los pares de conjuntos identificados con un radio de convolución de 50 km,
553 un umbral de 3 mm y un interés total de 0.7, se muestra la evolución del interés total medio
554 (Figura 13). Al igual que los índices de la verificación puntual, se observa el spin up en las
555 primeras 3 horas del plazo del pronóstico y máximos durante la mañana, cuando disminuye
556 la tasa de precipitación estimada. Si bien el interés total tiende a decaer con el tiempo, sus
557 valores se mantienen superiores a 0.9. Este alto interés entre el par pronosticado y
558 observado se debe a que los valores de distancias entre centroides y diferencia de ángulo
559 permanecen bajos para todos los plazos del pronóstico, la relación entre la intensidad
560 pronosticada por el WRF y la estimada por IMERG-F sigue siendo alta, y por último,
561 porque el tamaño de los conjuntos pronosticados es similar a los observados (no se
562 muestra).

563

564 El gráfico del interés total está basado sobre los objetos vinculados, es decir que estos
565 objetos fueron agrupados y dieron origen a los conjuntos. En la Figura 14 se observa que
566 MODE encuentra mayor cantidad de conjuntos durante la tarde y la noche (entre las 15 y
567 00 UTC) y comparando este resultado con la Figura 12, el aumento del número de
568 conjuntos está relacionado con el aumento de la tasa de precipitación. También puede
569 observarse que de la gran cantidad de objetos identificados en el campo del WRF fijando
570 un radio de convolución de 50 km y un umbral de 3 mm, solo un poco más del 40 %
571 corresponden a los objetos vinculados. Es decir que si bien el pronóstico del WRF obtuvo
572 un buen resultado en la verificación espacial de los objetos vinculados, no se están
573 contemplando el 60% de los casos que resultan de falsas alarmas en el campo pronosticado
574 y sorpresas en el campo de IMERG-F.

575 **4) CONCLUSIONES**

576

Artículo en edición

577 En este trabajo se aplicó por primera vez la metodología de verificación de pronósticos por
578 objetos empleada por el módulo MODE para los pronósticos de precipitación del modelo
579 WRF-SMN y GFS para todo el territorio argentino y para un período de dos años. Además
580 se compararon los resultados con metodologías tradicionales puntuales. El módulo MODE
581 está disponible en el software MET. El mismo requiere la elección de los valores de radio
582 de convolución y umbral, que dependen de los sistemas precipitantes que se quieran
583 estudiar. En este caso, el estudio estuvo focalizado en los sistemas de precipitación
584 moderada o intensa y en sistemas precipitantes que perduran en el tiempo. Para ello se
585 utilizaron un radio de convolución de 50 km y un umbral de 10 mm para los pronósticos de
586 precipitación acumulada a 24 horas. Para los pronósticos con valores acumulados a 3 horas
587 se empleó el mismo suavizado con un umbral de 3 mm. Estos parámetros permanecieron
588 fijos durante los dos años de análisis.

589

590 Los modelos verificados presentan falsas alarmas y sorpresas que se ven reflejados en los
591 índices de la verificación puntual y en los porcentajes de objetos vinculados de la
592 verificación espacial. Sin embargo, el porcentaje de objetos vinculados es sensible a los
593 valores de R y T ya que como se muestra en la Tabla I, la cantidad de objetos identificados
594 por MODE varía de acuerdo a la elección de dichos parámetros. La ventaja que propone
595 MODE es analizar en qué medida los modelos logran pronosticar la precipitación, tanto en
596 intensidad, ubicación y extensión.

597

598 Tanto el análisis de precipitación acumulada de 24 horas como de 3 horas demostraron que
599 la verificación espacial y puntual se complementan. La verificación puntual permite tener
600 una noción general del comportamiento de los modelos, aunque carga con la doble
601 penalización de las falsas alarmas y las sorpresas ya que el evento que no fue pronosticado
602 resulta luego en un evento sorpresa si es detectado en otra posición, aunque haya sido leve
603 su desplazamiento. Por su parte, la metodología por objetos permite verificar la forma,
604 tamaño, posición e intensidad de la precipitación pronosticada, lo cual le agrega valor a los
605 pronósticos que resultan de utilidad. Es importante destacar que en el análisis de las

Artículo en edición

606 características de la precipitación, al considerar sólo los objetos vinculados, no se
607 contemplaron las falsas alarmas y sorpresas.

608

609 Se encontró que el pronóstico de precipitación del WRF tiende a sobreestimar la cantidad
610 de eventos de precipitación y presenta falsas alarmas, pero tiene pocos errores asociados a
611 la posición, intensidad y extensión de la precipitación, cuando se realiza una verificación
612 espacial de los conjuntos identificados. Por otro lado, comparando los resultados del WRF
613 con los del GFS, la verificación punto a punto mostró que los pronósticos de precipitación
614 acumulada en 24 horas del GFS resultaron ser levemente mejores que los del WRF.
615 Mientras que a partir de la verificación espacial, se observó que el WRF representa con
616 mayor precisión la posición de la precipitación. Tanto la verificación espacial como la
617 verificación puntual demostraron que el desempeño de ambos modelos mejora durante el
618 invierno.

619

620 Este trabajo es un primer paso hacia la inclusión de técnicas de verificación espacial en un
621 esquema operativo. A partir de los resultados obtenidos se considera necesario continuar
622 evaluando los diferentes parámetros de MODE. Al variar el umbral de intensidad de
623 precipitación o el suavizado de los campos, la cantidad de eventos y objetos que
624 representan falsas alarmas y sorpresas se verá modificado. Si bien los valores de radio y
625 umbral de intensidad elegidos para la verificación espacial resultaron apropiados para un
626 análisis general, se plantea la necesidad de considerar una variación de dichos valores en
627 función de la región y de la época del año, considerando la utilización de percentiles de
628 intensidad de precipitación (Skinner y otros, 2018).

629

630 AGRADECIMIENTOS

631

632 Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto PICT 2017 - 00221 y parcialmente
633 financiado por el mismo. Agradecemos asimismo a los revisores del artículo por sus
634 valiosas sugerencias. Además agradecemos al equipo de soporte técnico del MET por su

Artículo en edición

635 asesoramiento en el uso del software, al Servicio Meteorológico Nacional de Argentina por
636 facilitar los pronósticos generados con el modelo WRF y también al NCEP por proveer
637 generosamente los análisis y pronósticos del GFS.

638

639 REFERENCIAS

640

641 Bender F.D. y Ynoue R., 2014: Application of a spatial verification method to GFS
642 precipitation forecasts. Revista Brasileira de Geofísica. 32. 561-571.

643 Brown, B. G., Bullock, R. R., Davis, C. A., Gotway, J. H., Chapman, M. B., Takacs, A.,
644 Gilleland, E., Manning, K. y Mahoney, J. L., 2004: New verification approaches for
645 convective weather forecasts. In Proceedings of the 22nd Conference on Severe Local
646 Storms.

647 Brown, B. G., Brown, B. G., Gotway, J. H., Bullock, R., Gilleland, E., Fowler, T.,
648 Ahijevych, D. y Jensen, T., 2009: The model evaluation tools (MET): community tools for
649 forecast evaluation. In Preprints, 25th Conf. on International Interactive Information and
650 Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Phoenix, AZ,
651 Amer. Meteor. Soc. A, 9(6).

652 Carrasco A.R., 2017: Método de avaliação orientada a objeto aplicado às previsões de
653 precipitação sobre a América do Sul. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São
654 José dos Campos, 116p.

655 Charó, G. D., Collini, E. A. y Dillon, M. E., 2014: La utilización del met (model evaluation
656 tool) para la verificación de los pronósticos del modelo wrf-arw/shn-smn durante la
657 primavera de 2011. Meteorologica, 39(2), 49-68.

658 Clark, A. J., Weiss, S., Kain, J., Jirak, I., Coniglio M., Melik, C., Sietwet C., Sobash, R.,
659 Marsh, P., Dean, A., Xue, F., Thomas, K., Wang, Y., Brewster, K., Gao, J., Wang, X., Du,
660 J., Novak, D. y Correia, J.J., 2012: An overview of the 2010 hazardous weather testbed

Artículo en edición

- 661 experimental forecast program spring experiment. Bulletin of the American Meteorological
 662 Society, 93(1), 55-74.
- 663
- 664 Davis, C., Brown, B. y Bullock, R., 2006.a: Object-based verification of precipitation
 665 forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. Monthly Weather
 666 Review, 134(7), 1772-1784.
- 667 Davis, C., Brown, B. y Bullock, R. 2006.b: Object-based verification of precipitation
 668 forecasts. Part II: Application to convective rain systems. Monthly Weather Review,
 669 134(7), 1785-1795.
- 670 Davis, C. A., Brown, B. G., Bullock, R. y Halley-Gotway, J., 2009: The Method for
 671 Object-Based Diagnostic Evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005
 672 NSSL/SPC Spring Program. Weather and Forecasting, 24 (5), 1252-1267.
- 673
- 674 Done, J., Davis, C. A. y Weisman, M., 2004: The next generation of NWP: Explicit
 675 forecasts of convection using the Weather Research and Forecasting (WRF) model.
 676 Atmospheric Science Letters, 5(6), 110-117.
- 677
- 678 Flora, M. L., Skinner, P. S., Potvin, C. K., Reinhart, A. E., Jones, T. A., Yussouf, N. y
 679 Knopfmeier, K. H., 2019: Object-based verification of short-term, storm-scale probabilistic
 680 mesocyclone guidance from an experimental Warn-on-Forecast system. Weather and
 681 Forecasting, 34(6), 1721-1739.
- 682
- 683 Foelsche, U., Kirchengast, G., Fuchsberger, J., Tan, J. y Petersen, W. A., 2017: Evaluation
 684 of GPM IMERG Early, Late, and Final rainfall estimates using WegenerNet gauge data in
 685 southeastern Austria. Hydrology and Earth System Sciences, 21(12), 6559-6572.
- 686

Artículo en edición

- 687 Fowler, T., Halley Gotway J., Newman, K., Jensen, T., Brown, B. y Bullock, R., 2017: The
688 Model Evaluation Tools v7.0 (METv7.0) User's Guide. Developmental Testbed Center,
689 407 pp.
690
- 691 García Skabar, Y., Matsudo, C. M., Sacco, M., Ruiz, J. J. y Righetti, S.A., 2018:
692 Implementación modelo de pronóstico numérico WRF. Nota Técnica SMN, 2018-45.
- 693 Gilleland, E., Ahijevych, D. A., Brown, B. G. y Ebert, E. E., 2010: Verifying forecasts
694 spatially. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(10), 1365-1376.
- 695 Gilleland, E., 2020: Novel measures for summarizing high-resolution forecast performance.
696 Submitted to Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography on, 19.
- 697 Gilleland, E., Skok, G., Brown, B. G., Casati, B., Dorninger, M., Mittermaier, M. P.,
698 Roberys N. y Wilson, L. J., 2020: A Novel Set of Geometric Verification Test Fields with
699 Application to Distance Measures. Monthly Weather Review, 148(4), 1653-1673.
- 700 Griffin, S. M., Otkin, J. A., Rozoff, C. M., Sieglaff, J. M., Cnonce, L. M., Alexander, C. R.,
701 Jensen, T. L. y Wolff, J. K., 2017: Seasonal analysis of cloud objects in the High-
702 Resolution Rapid Refresh (HRRR) model using object-based verification. Journal of
703 Applied Meteorology and Climatology, 56(8), 2317-2334.
704
- 705 Hobouchian, M. P., 2015: Estimaciones de precipitación por satélite en el área Subtropical
706 de Sudamérica: análisis y validación. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires,
707 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
708
- 709 Hobouchian, M. P., Salio, P., Skabar, Y. G., Vila, D. y Garreaud, R., 2017: Assessment of
710 satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes. Atmospheric
711 research, 190, 43-54.
712

Artículo en edición

- 713 Huffman G.J., Bolvin D.T. y Nelkin E.J., 2015: Integrated Multi-satellitE Retrievals for
714 GPM (IMERG) Technical Documentation. NASA/GSFC Code 612, 47.
715
- 716 Johnson, A. y Wang, X., 2012a: Verification and calibration of neighborhood and object-
717 based probabilistic precipitation forecasts from a multimodel convection-allowing
718 ensemble. *Monthly Weather Review*, 140(9), 3054-3077.
719
- 720 Johnson, A., Wang, X., Kong, F. y Xue, M., 2013: Object-based evaluation of the impact of
721 horizontal grid spacing on convection-allowing forecasts. *Monthly Weather Review*,
722 141(10), 3413-3425.
723
- 724 Kain, J. S., Weiss, S. J., Bright, D. R., Baldwin, M. E., Levit, J. J., Carbin, G. W.,
725 Schawartz, C.R., Weisman, M.L., Droegemeier, K.K., Weber, D. B. y Thomas, K. W.,
726 2008: Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation
727 of operational convection-allowing NWP. *Weather and Forecasting*, 23(5), 931-952.
728
- 729 Marino, M. B., 2007: Variabilidad de la precipitación en Argentina en diferentes escalas
730 temporales, relacionada con actividad convectiva observada. Documentación de la
731 metodología para el tratamiento de la información. Verificación del desempeño de un
732 modelo regional de pronóstico de precipitación. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias
733 Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
734
- 735 Matsudo, C., Salles, M. A., y García Skabar, Y., 2021: Verificación de los pronósticos del
736 esquema determinístico del modelo WRF para el año 2020. *Nota Técnica SMN*, 2021-95.
737
- 738 Moser, B. A., Gallus Jr, W. A. y Mantilla, R., 2015: An initial assessment of radar data
739 assimilation on warm season rainfall forecasts for use in hydrologic models. *Weather and*
740 *Forecasting*, 30(6), 1491-1520.
741

Artículo en edición

- 742 Mittermaier, M. P. y Bullock, R., 2013: Using MODE to explore the spatial and temporal
 743 characteristics of cloud cover forecasts from high-resolution NWP models. *Meteorological*
 744 *Applications*, 20(2), 187-196.
 745
- 746 Mittermaier, M., North, R., Maksymczuk, J., Pequignet, C. y Ford, D., 2020: Using feature-
 747 based verification methods to explore the spatial and temporal characteristics of forecasts of
 748 the 2019 Chlorophyll-a bloom season over the European North-West Shelf. *Ocean Science*
 749 *Discussions*, 1-47.
 750
- 751 Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. ECMWF
 752 Tech. Memo. N. 430 (19pp).
 753
- 754 Roebber, P. J., Schultz, D. M., Colle, B. A. y Stensrud, D. J., 2004: Toward improved
 755 prediction: High-resolution and ensemble modeling systems in operations. *Weather and*
 756 *Forecasting*, 19(5), 936-949.
 757
- 758 Rossa A, Nurmi P. y Ebert E., 2008: Overview of methods for the verification of
 759 quantitative precipitation forecasts. *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation*
 760 *and Prediction*, Michaelides S (ed.). Springer Verlag; 419–452.
 761
- 762 Salio, P., Nicolini, M. y Zipser, E. J., 2007: Mesoscale convective systems over
 763 southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet.
 764 *Monthly Weather Review*, 135(4), 1290-130
 765
- 766 Skinner, P. S., Wheatley, D. M., Knopfmeier, K. H., Reinhart, A. E., Choate, J. J., Jones, T.
 767 A., Creager, G., Dowell, D., Alexander, C., Ladwig, T., Wicker, L. Heinselman, P., Minnis,
 768 P. y Palikonda, R., 2018: Object-based verification of a Prototype Warn-on-Forecast
 769 System. *Weather and Forecasting*, 33(5), 1225-1250.
 770

Artículo en edición

- 771 Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W. y
772 Powers, J. G., 2005: A description of the advanced research WRF version 2 (No.
773 NCAR/TN-468+ STR). Tech. Note TN-475+STR, NCAR/TN-468+STR.
- 774 Tan, J., Petersen, W. A., Kirstetter, P. E. y Tian, Y., 2017: Performance of IMERG as a
775 function of spatiotemporal scale. *Journal of hydrometeorology*, 18(2), 307-319.
776
- 777 Wang, Z., Zhong, R., Lai, C. y Chen, J., 2017: Evaluation of the GPM IMERG satellite-
778 based precipitation products and the hydrological utility. *Atmospheric Research*, 196, 151-
779 163.
780
- 781 Wolff, J. K., Harrold, M., Fowler, T., Gotway, J. H., Nance, L. y Brown, B. G., 2014:
782 Beyond the basics: Evaluating model-based precipitation forecasts using traditional, spatial,
783 and object-based methods. *Weather and Forecasting*, 29(6), 1451-1472.
784
- 785 Yan, H. y Gallus Jr, W. A., 2016: An evaluation of QPF from the WRF, NAM, and GFS
786 models using multiple verification methods over a small domain. *Weather and Forecasting*,
787 31(4), 1363-1379.
788
- 789 Zingerle, C. y Nurmi, P., 2008: Monitoring and verifying cloud forecasts originating from
790 operational numerical models. *Meteorological Applications: A journal of forecasting,*
791 *practical applications, training techniques and modelling*, 15(3), 325-330.
792
793
794
795
796
797
798
799

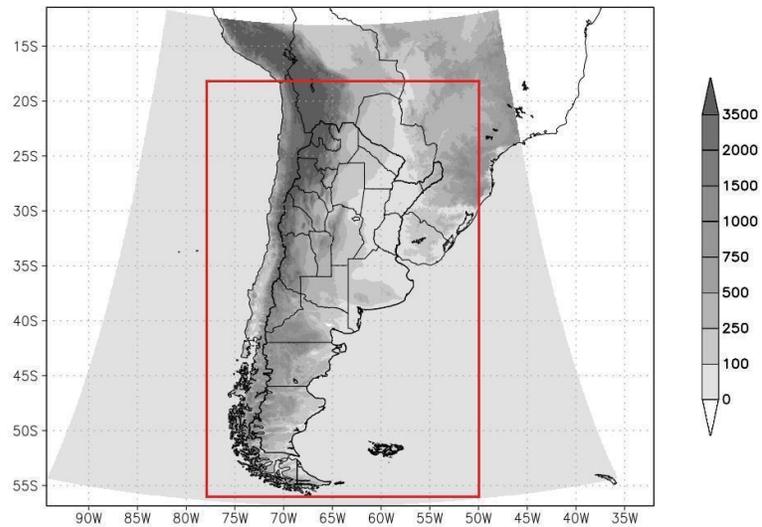
Artículo en edición

800

801 **Figuras y Tablas**

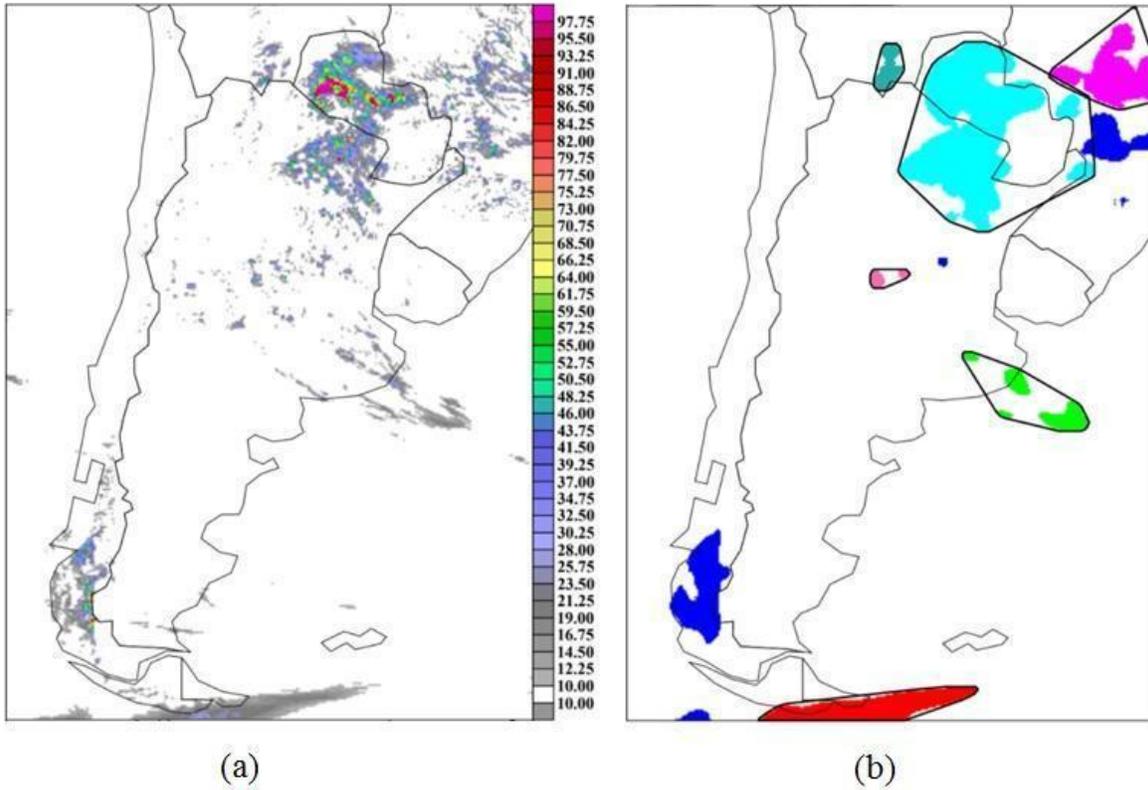
802

803



804

805 Figura 1: La región sombreada representa el dominio del pronóstico del modelo WRF y la
806 escala de grises indica la topografía en metros. El rectángulo rojo indica el área de
807 verificación.

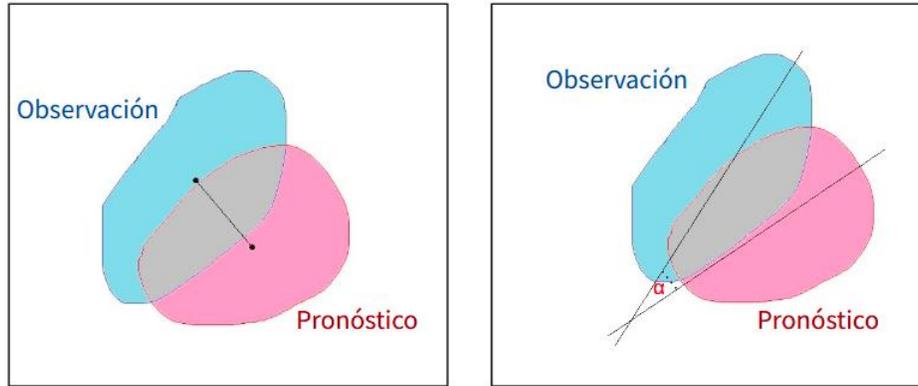


808 Figura 2: (a) Campo original del pronóstico de precipitación acumulada del WRF entre el
809 18 y 19 de febrero 2018 a las 12 UTC. (b) Las regiones sombreadas representan los objetos
810 y los objetos agrupados dentro de los bordes negros representan los conjuntos identificados
811 por MODE en el campo (a).

812
813
814
815
816
817
818
819
820

Artículo en edición

821



(a) Distancia entre centroides

(b) Diferencia de ángulo

822

823 Figura 3: Esquema de (a) la distancia entre centroides y de (b) la diferencia de ángulo (α)

824 entre el objeto del pronóstico (rosa) y de la observación (celeste).

825

826

827

828

829

830

831

832

833

834

835

836

837

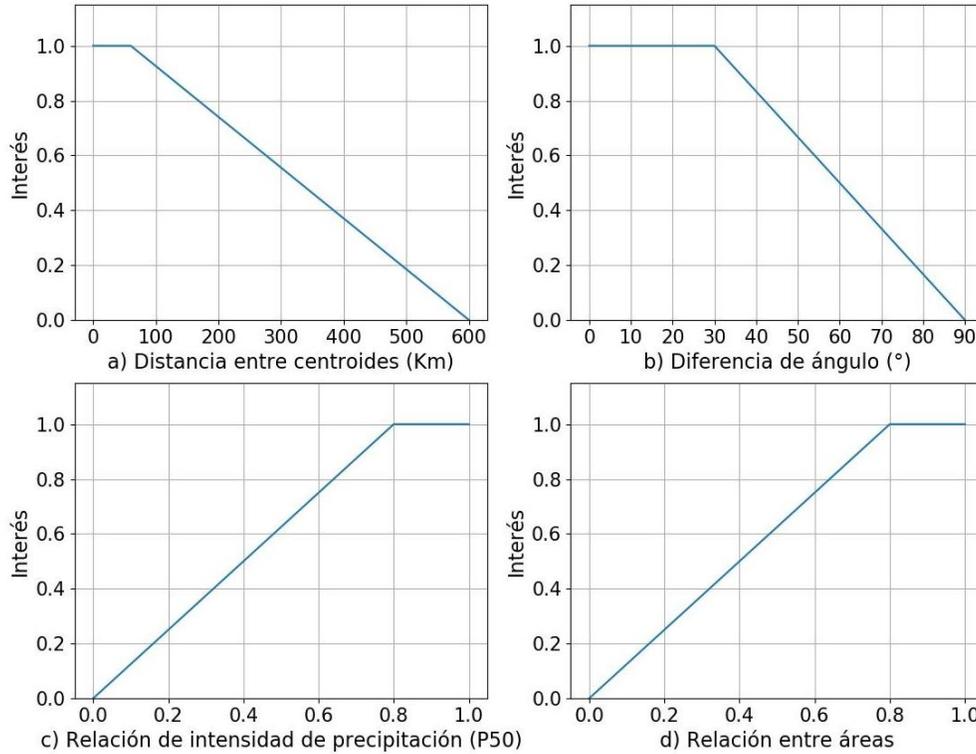
838

839

840

841

842



843

844 Figura 4: Funciones de interés empleadas en MODE para a) distancia entre centroides, b)

845 diferencia de ángulo, c) relación de intensidad de precipitación y d) relación entre áreas.

846

847

848

849

850

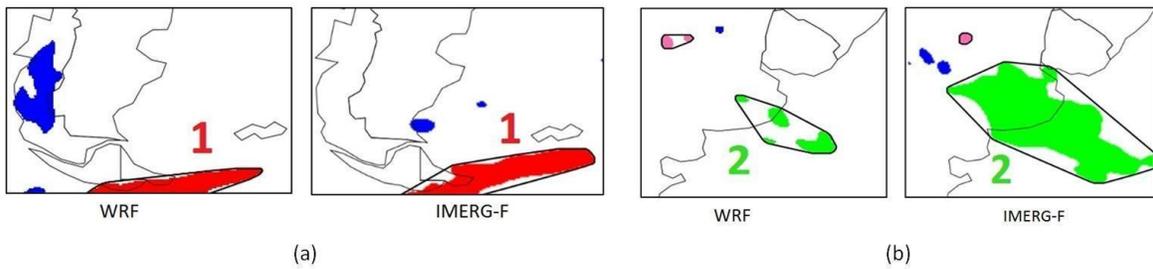
851

852

853

854

Artículo en edición



855

856 Figura 5: Ejemplo de pares de conjuntos definidos por MODE en el pronóstico y la
857 estimación de precipitación a) par-conjunto 1; b) par-conjunto 2.

858

859

860

861

862

863

864

865

866

867

868

869

870

871

872

873

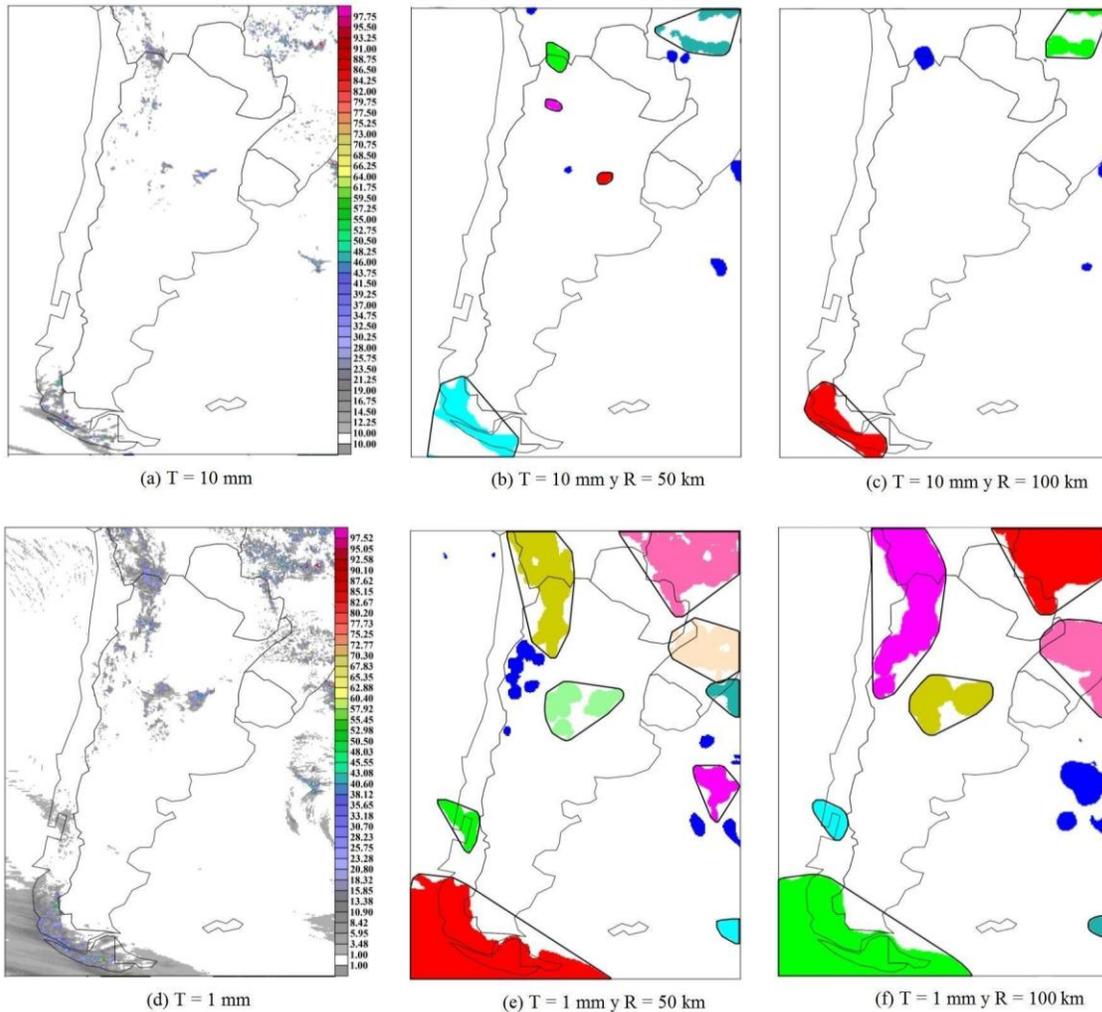
874

875

876

877

878



879
 880 Figura 6: Precipitación pronosticada acumulada entre el 18 y 19 de febrero 2018 a las 12
 881 UTC con un umbral de a) 10 mm y d) 1mm. Objetos y conjuntos identificados por MODE
 882 con: b y c) umbral de 10 mm y R de 50 y 100 km respectivamente, e) y f) umbral de 1 mm
 883 y R de 50 y 100 km respectivamente. Los colores identifican objetos y los bordes negros,
 884 los conjuntos.

885

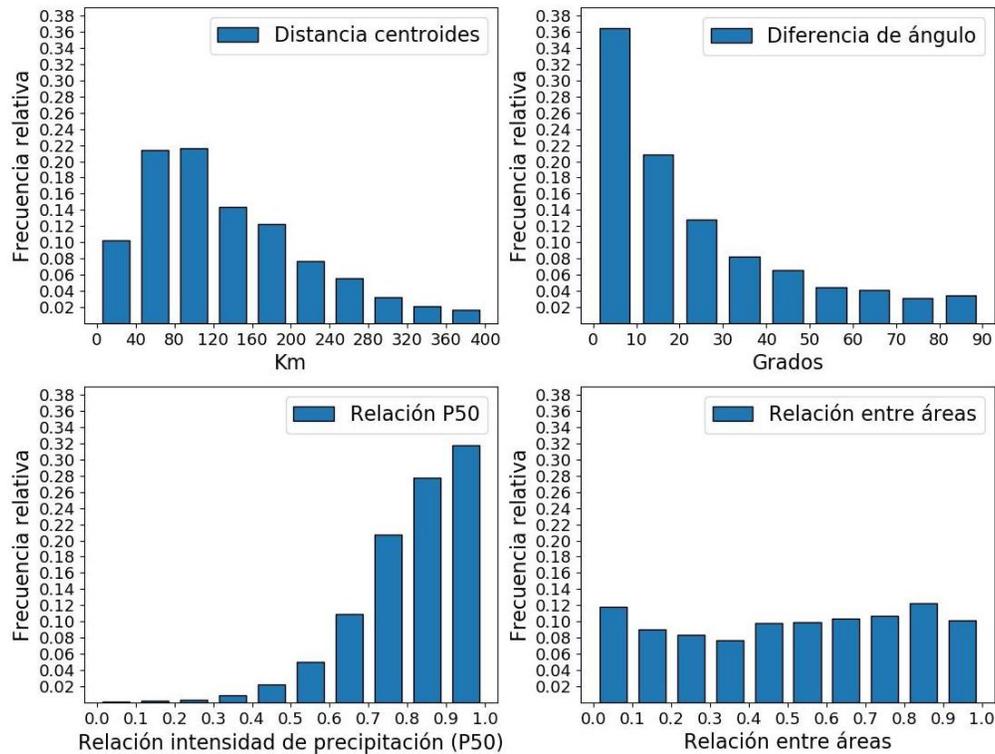
886

887

888

889

Artículo en edición



890

891 Figura 7: Frecuencias relativas de atributos entre pares de conjuntos detectados para
 892 precipitación acumulada en 24 horas del WRF para el período 2017-2018. Se muestran la
 893 distancia entre centroides, la diferencia de ángulo, la relación entre el percentil 50 de
 894 intensidad de precipitación y la relación entre las áreas de los conjuntos entre el campo del
 895 WRF y del IMERG-F.

896

897

898

899

900

901

902

903

904

905

Artículo en edición

906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927

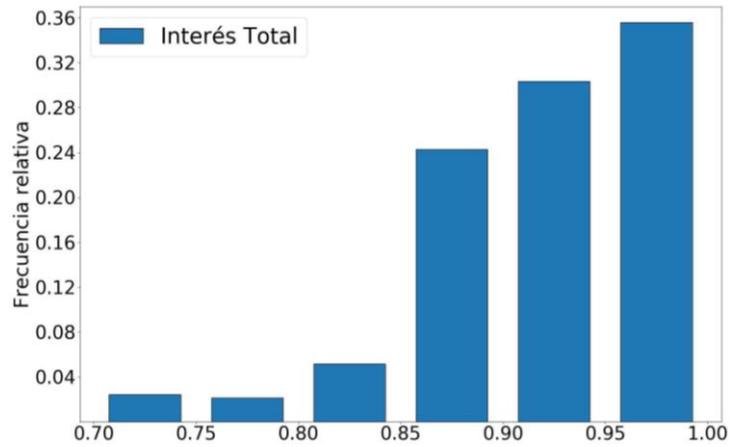
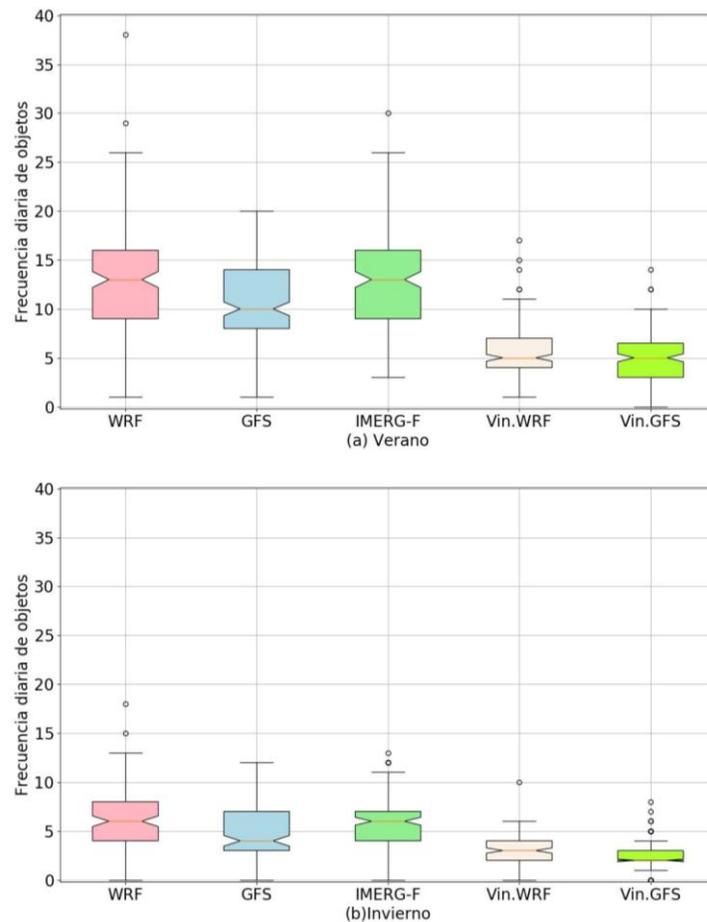


Figura 8: Frecuencia relativa del interés total entre pares de conjuntos para precipitación acumulada en 24 horas del WRF para el período 2017-2018.

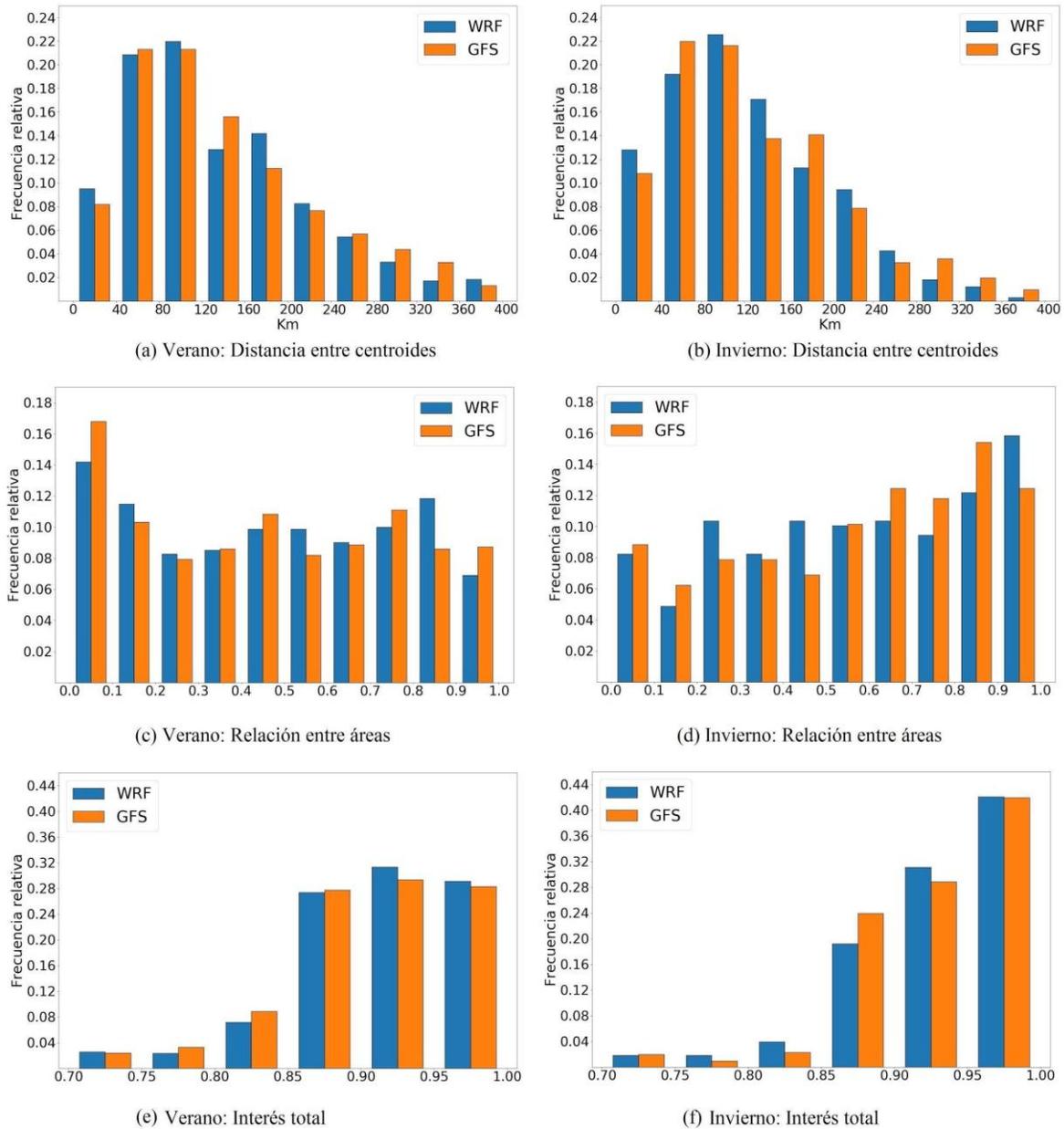
Artículo en edición



928

929 Figura 9: Diagrama de cajas de la frecuencia de objetos encontrados diariamente en los
 930 pronósticos del WRF y del GFS, y en la estimación IMERG-F para precipitación
 931 acumulada de 24 horas en el período 2017-2018. Para el total de objetos (WRF, GFS,
 932 IMERG-F) y objetos vinculados (Vin.WRF, Vin.GFS) en el verano (a) y en el invierno (b).
 933 La caja de los diagramas está formada por el intervalo intercuartil, entre el percentil 75
 934 (P75) y el percentil 25 (P25). La parte angosta corresponde a la mediana. El bigote superior
 935 se extiende hasta el último dato menor que $P75 + 1.5 \cdot (P75 - P25)$, y el bigote inferior se
 936 extiende hasta el primer dato mayor que $P25 - 1.5 \cdot (P75 - P25)$. Los puntos representan los
 937 eventos fuera de rango.

Artículo en edición



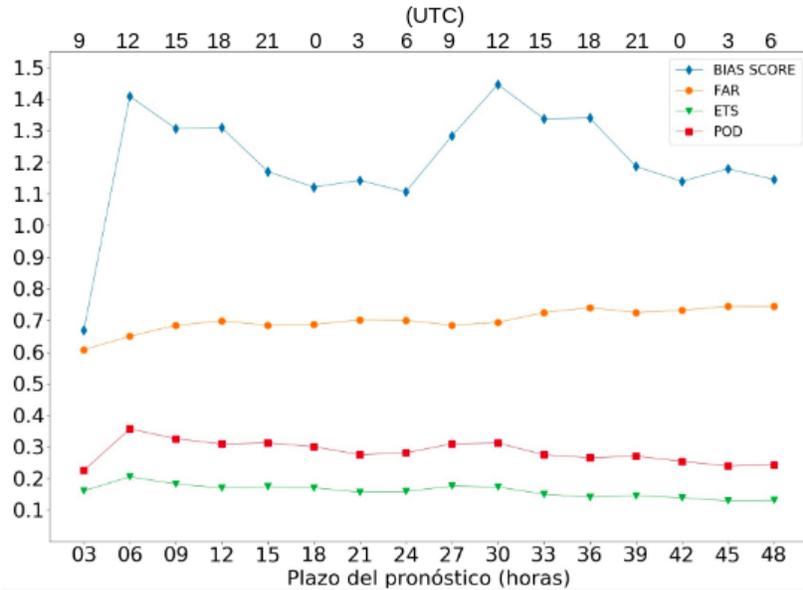
938

939 Figura 10: Frecuencias relativas de atributos entre pares de conjuntos detectados para
 940 precipitación acumulada en 24 horas del WRF (azul) y del GFS (naranja) para el verano e
 941 invierno del período 2017-2018. Distancia entre centroides (a y b), relación entre áreas (c y
 942 d), interés total (e y f).

943

Artículo en edición

944

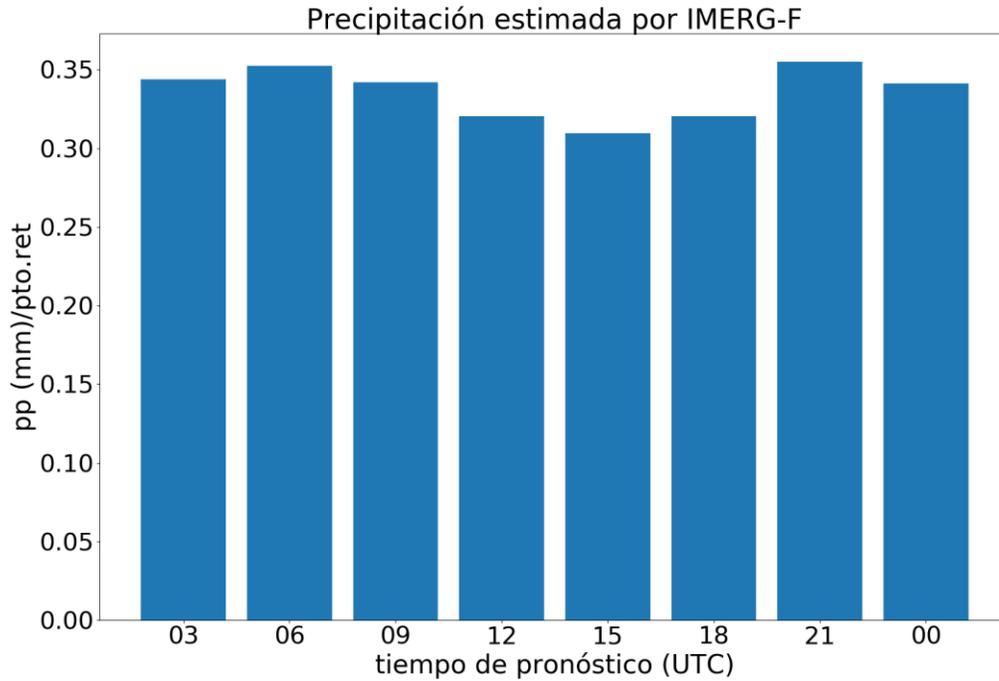


945

946 Figura 11: Valores medios de estadísticos de verificación para el pronóstico de
 947 precipitación acumulada en 3 horas del WRF considerando intensidades de precipitación
 948 mayores o iguales a 3 mm, para el periodo 2017-2018. El eje x superior indica la hora de
 949 validez del pronóstico en horas UTC.

950

951



952

953 Figura 12: Tasa de precipitación acumulada cada 3 horas por punto de retícula estimada por
954 IMERG-F, para el periodo 2017-2018 y para el dominio de verificación.

955

956

957

958

959

960

961

962

963

964

965

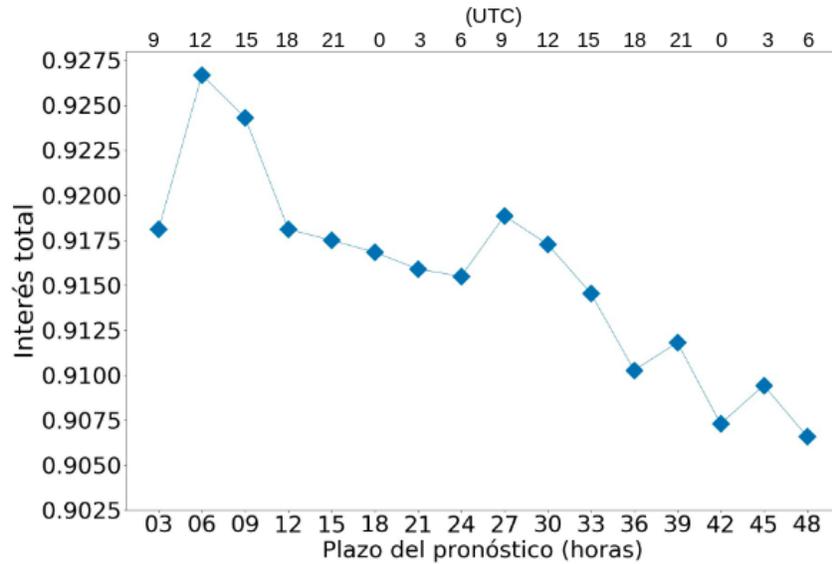
966

967

968

Artículo en edición

969
970
971
972

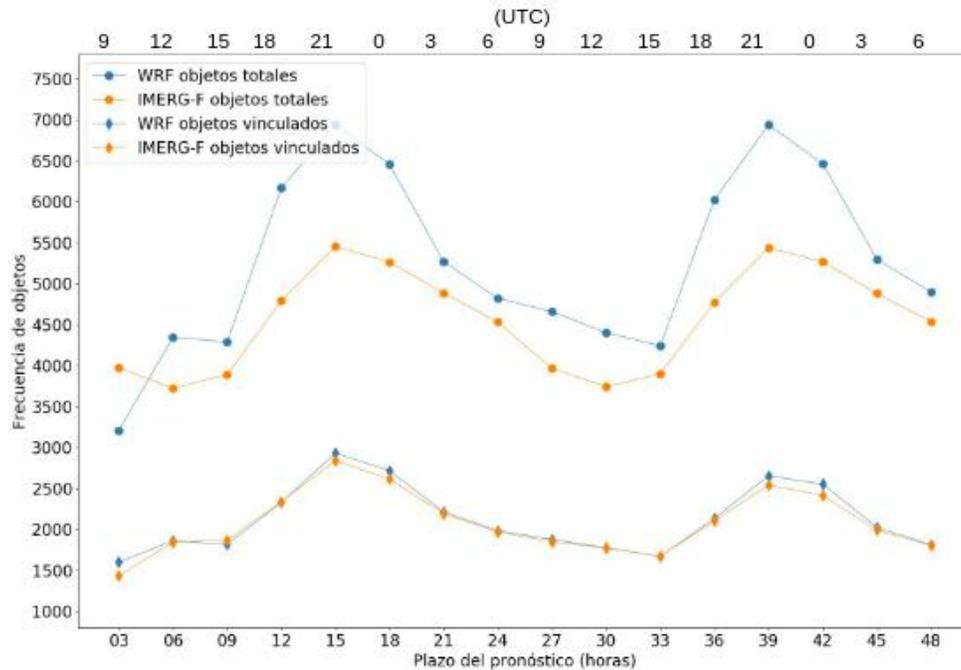


973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994

Figura 13: Valor medio del interés total entre pares de conjuntos para la precipitación acumulada en 3 horas del WRF en función del plazo de pronóstico para el período 2017-2018. El eje x superior indica la hora de validez del pronóstico en horas UTC.

Artículo en edición

995



996

997

998 Figura 14: Frecuencia absoluta de objetos en el campo de precipitación pronosticada del
 999 WRF (azul) y en el campo de IMERG-F (naranja), para la precipitación acumulada cada 3
 1000 horas en función del plazo de pronóstico para el período 2017-2018. Se muestran objetos
 1001 totales y objetos vinculados. El eje x superior indica la hora de validez del pronóstico en
 1002 horas UTC.

1003

1004

1005

1006

1007

1008

1009

1010

1011

1012

1013

1014

Artículo en edición

1015

1016

	$T \geq 1$ mm	$T \geq 10$ mm
R = 50 km	172 (176)	147 (150)
R = 100 km	102 (101)	89 (93)

1017

1018 Tabla I: Cantidad de objetos vinculados para diferentes valores de T y R, para precipitación

1019 acumulada en 24 horas durante el mes de febrero 2018 para el pronóstico del modelo WRF

1020 y entre paréntesis para la estimación IMERG-F.

1021

1022

1023

1024

1025

1026

1027

1028

1029

1030

1031

1032

1033

1034

1035

1036

1037

1038

1039

1040

1041

Artículo en edición

1042

1043

	BIAS SCORE	POD	ETS	FAR
WRF	1,08	0,45	0,27	0,54
GFS	1,13	0,48	0,28	0,53

1044

1045 Tabla II: Valores medios de estadísticos de verificación para el pronóstico de precipitación
1046 acumulada en 24 horas del WRF y del GFS considerando intensidades de precipitación
1047 mayores o iguales a 10 mm, para el periodo 2017-2018.

1048

1049

1050

1051

1052

1053

1054

1055

1056

1057

1058

1059

1060

1061

1062

1063

1064

1065

1066

1067

1068

1069

1070

1071

1072

1073

Artículo en edición

1074
1075
1076

	VERANO		INVIERNO	
	WRF	GFS	WRF	GFS
BIAS SCORE	0,94	1,07	1,27	1,22
POD	0,36	0,41	0,52	0,53
ETS	0,20	0,22	0,31	0,34
FAR	0,60	0,60	0,59	0,49

1077

1078 Tabla III: Valores medios de estadísticos de verificación para el pronóstico de precipitación
1079 acumulada del WRF y del GFS considerando intensidades de precipitación mayores o
1080 iguales a 10 mm acumulada en 24 horas, para los meses de verano y de invierno del periodo
1081 2017-2018.

1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107

Artículo en edición

1108
1109
1110

	VERANO		INVIERNO	
	WRF	GFS	WRF	GFS
Objetos totales	2370	1958	822	659
Objetos vinculados	1021 (43%)	899 (46%)	379 (46%)	343 (52%)

1111
1112 Tabla IV: Cantidad de objetos totales y vinculados con radio de convolución de 50 km y
1113 umbral de intensidad mayor o igual a 10 mm, para precipitación acumulada en 24 horas
1114 durante el verano e invierno del período 2017-2018, para los pronósticos de los modelos
1115 WRF y GFS. Entre paréntesis se muestra el porcentaje de objetos vinculados respecto del
1116 total de objetos.
1117