

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE LA PREDICCIÓN ESTACIONAL DE
PRECIPITACIÓN DEL MODELO CFS EN COSTA RICA DURANTE EL
INVIERNO BOREAL

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la
Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la
Atmósfera para optar por el grado y título de la Maestría Profesional en
Meteorología Operativa

BERNY FALLAS LÓPEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2019

Dedicatoria

A mis Padres y Tita por todo su amor e incondicional apoyo, gracias por dejarme ser lo que siempre quise ser. A mi Iris por ser mi inspiración, darme dos inspiraciones más (Berny Daniel y Emma Sofía), así como estar ahí siempre con su amor y comprensión, empujándome, dándome ánimos, la mejor compañera de vida que pude encontrar. A mi Hermano Jorge, por hacer la puesta a punto de mi computadora, a Papá Saúl (Q.E.P.D.), por sus consejos y motivación a seguir adelante en mis estudios, a mi Suegrita por sus palabras de aliento y todo el apoyo a distancia, el cual siempre siento cerca.

Agradecimientos

Primero que todo a Dios y a la Virgen que me dieron la salud y las fuerzas para alcanzar esta meta, a mis familiares cercanos por su apoyo e inspiración.

Al Dr. Erick Rivera, por aceptar ser mi tutor en este trabajo y tener tanta paciencia y comprensión para entender mis enredos, así como por enseñarme tantas cosas en tan poco tiempo, sin su guía este estudio no tendría el nivel y éxito que tiene.

Al Dr. Tito Maldonado por sus observaciones puntuales y de mucho peso, dando insumos suficientes para haber mejorado el trabajo aún más.

Al Dr. Rodrigo Castillo por sus valiosos aportes en lo que a presentación de la información se refiere, haciendo mucho más claro, pulcro y entendible este trabajo.

A Doña Patricia Ramírez, ya que gracias a su confianza y cariño me ha ayudado a crecer profesionalmente a través de los años.

A Doña Berta Olmedo, por estar pendiente de este estudio y su incondicional apoyo.

A mi equipo de trabajo por todo el apoyo emocional y las valiosas sugerencias que me brindaron.

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Meteorología Operativa.”



Dra. Gabriela Mora Rojas
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado



Dr. Erick Rivera Fernández
Profesor Guía



Dr. Rodrigo Castillo Rodríguez
Lector



Dr. Tito Maldonado Mora
Lector



Dra. Ana María Durán Quesada
Directora Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera



Verny Fallas López
Sustentante

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Tabla de Contenidos.....	v
Resumen.	vii
Lista de Tablas	viii
Lista de figuras	ix
Capítulo 1. Justificación y antecedentes.....	1
1.1 Justificación	1
1.2 Antecedentes	2
Capítulo 2. Objetivos	4
2.1 Objetivo general	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
Capítulo 3. Marco Teórico	5
3.1 Generalidades del clima en Costa Rica para el período invernal.....	5
Capítulo 4. Datos, Herramientas y Métodos.....	7
4.1 Datos.....	7
4.1.1 Modelo Climate Forecast System (CFS).....	7
4.1.2 Datos satelitales del Proyecto de Climatología Global de Precipitación (GPCP).....	12
4.1.3 Datos Satelitales de Precipitación Estimada de Manera Remota usando Redes Neuronales Artificiales (PERSIANN).....	13
4.1.4 Datos de Reanálisis de Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL) de NOAA.....	17
4.1.5 Base de datos de Hidrología (Instituto Costarricense de Electricidad).	17
4.2 Herramientas.....	17
4.2.1 Climate Data Operators (CDO).....	17
4.2.2 Tabla de Contingencia	17
4.2.3 Grid Analysis and Display System (GrADS).....	18
4.3 Métodos.....	18
5. Resultados.....	22
5.1 Diferencias entre los pronósticos del modelo CFSv2 y las estimaciones satelitales (PERSIANN).....	25
5.1.1 Setiembre para el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF)	25

5.1.2 Octubre para el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF)	26
5.1.3 Noviembre para el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF)	26
5.2 Corriente en chorro de bajo nivel del Caribe	28
5.3 Tabla de Contingencia	31
5.3.1 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para diciembre.....	32
5.3.3. Predicción de setiembre, octubre y noviembre para febrero.	36
5.3.4 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para diciembre en Arenal. ..	36
5.3.5 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para enero en Arenal.	38
5.3.6 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para febrero en Arenal.....	38
5.3.7 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para diciembre en Cachí.....	41
5.3.8 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para enero en Cachí.	41
5.3.9 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para febrero en Cachí.	44
6. Discusión	46
7. Aplicación de la Investigación	48
8. Conclusiones	50
9. Recomendaciones.....	51
10. Referencias	52
11. Anexo	56
11.1 Setiembre para el mes de diciembre.	56
11.2 Octubre para el mes de diciembre.....	56
11.3 Noviembre para el mes de diciembre.	57
11.4 Setiembre para el mes de enero.	58
11.5 Octubre para el mes de enero.	59
11.6 Noviembre para el mes de enero.	60
11.7 Setiembre para el mes de febrero.....	61
11.8 Octubre para el mes de febrero.....	62
11.9 Noviembre para el mes de febrero.....	63

Resumen.

En el presente estudio se evalúa el desempeño del modelo Climate Forecast System (CFS) en cuanto a la generación de pronósticos de precipitación de los meses de setiembre, octubre y noviembre, para diciembre, enero y febrero. Se inició haciendo la valoración utilizando imágenes de satélite y una vez verificando que los resultados eran buenos, se procedió a verificar con datos de precipitación promedio areal de los embalses hidroeléctricos de Arenal y Cachí, obteniéndose resultados positivos en los pronósticos realizados a partir del mes de octubre.

Lista de Tablas

Tabla 1. Valores promedios históricos de la intensidad del chorro (m/s) según datos de Reanálisis y los pronósticos del CFSv2, para distintos meses de predicción.....28

Tabla 2. Valores promedios históricos de la intensidad del chorro (m/s) según datos de Reanálisis y los pronósticos del CFSv2, para años Niño.40

Tabla 3. Valores promedios históricos de la intensidad del chorro (m/s) según datos de Reanálisis y los pronósticos del CFSv2, para años Niña.41

Lista de figuras

Figura 1. Variación de la precipitación mensual promedio, para la zona de Cachí y Arenal.	6
Figura 2. Error sistemático medio anual para tres parámetros (Temperatura a 2 metros de altura en grados Kelvin, tasa de precipitación en mm/día y temperatura superficial del mar en grados Kelvin) evaluados con un rezago de 3 meses, como la diferencia entre lo predicho y la climatología observada para el período completo de 1982 al 2009. Tomado de Saha et al. (2014).....	11
Figura 3. Esquema del algoritmo PERSIANN – CDR para reconstruir el histórico de precipitación. Tomado de Ashouri et al. 2015.....	16
Figura 4. Región cubierta por la información usada del modelo CFS, para comparar con los datos de precipitación del PERSIANN y de la lluvia media por área de las cuencas Arenal y Cachí.....	21
Figura 5. Precipitación promedio (mm) para los meses de diciembre, enero y febrero GPCP (izquierda) y PERSIANN (derecha).....	23
Figura 6. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de setiembre del CFSv2 para el período Diciembre, Enero y Febrero (DEF) y la estimación satelital de PERSIANN.	25
Figura 7. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de octubre del CFSv2 para el período Diciembre, Enero y Febrero (DEF) y la estimación satelital de PERSIANN.	26
Figura 8. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de noviembre del CFSv2 para el período Diciembre, Enero y Febrero (DEF) y la estimación satelital de PERSIANN.	27
Figura 9. Comportamiento de cada uno de los pronósticos de la corriente en chorro del Caribe por el modelo CFSv2 y el comportamiento histórico según el Reanálisis.	29
Figura 10. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para diciembre coincida en tercil con las estimaciones de precipitación del PERSIANN.	33
Figura 11. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para enero coincida en tercil con las estimaciones de precipitación del PERSIANN.	34

Figura 12. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para febrero coincida en tercil con las estimaciones de precipitación del PERSIANN. 35

Figura 13. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para diciembre coincida en tercil con la lluvia media por área de Arenal. 37

Figura 14. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para enero coincida en tercil con la lluvia media por área de Arenal. 39

Figura 15. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para febrero coincida en tercil con la lluvia media por área de Arenal... 40

Figura 16. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para diciembre coincida en tercil con la lluvia media por área de Cachí. 42

Figura 17. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para enero coincida en tercil con la lluvia media por área de Cachí. 43

Figura 18. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para febrero coincida en tercil con la lluvia media por área de Cachí. 45



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Berny Gerardo Fallas López, con cédula de identidad 1-1103-0889, en mi condición de autor del TFG titulado Evaluación de la Predicción Estacional de Precipitación del Modelo CFS en Costa Rica durante el Invierno Boreal

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Berny Gerardo Fallas López

Número de Carné: 991492 Número de cédula: 1 - 1103 - 0889

Correo Electrónico: bernyfallas@gmail.com

Fecha: 21 de noviembre, 2019 Número de teléfono: 8842-3304

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Erick Rivera Fernández

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo 1. Justificación y antecedentes.

1.1 Justificación

A lo largo de los últimos años, conforme la demanda de energía ha aumentado, la predicción climática estacional ha tomado mayor relevancia y es necesaria para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), con el objetivo de hacer un óptimo uso de las energías renovables disponibles a lo largo del año. Caso especial resulta ser el período de invierno boreal, para el cual es sumamente importante conocer con antelación su comportamiento desde el punto de vista climático. Este período coincide con la época seca en el Valle Central y el Pacífico de Costa Rica y presenta una alta demanda de electricidad.

Debido a que la matriz energética nacional está compuesta en más de un 80% por embalses hidroeléctricos, ubicados en su mayoría sobre la Vertiente del Caribe del país, es vital conocer la disponibilidad del recurso hídrico para hacerle frente al estiaje que permita satisfacer la demanda eléctrica con este recurso, así como con el viento, la geotermia, el recurso solar y la energía térmica. Esta última se usa cuando existe una proyección de acumulados deficitarios de lluvia, lo cual implica tomar acciones a fin de contrarrestar esta posible situación mediante un mayor empleo de energía térmica. Sin embargo, esta es la energía más cara para el país, ya que se requiere la importación de búnker, cuyo costo depende de los precios del petróleo, por lo que se necesita una adecuada planificación para su compra. La logística para contar con este recurso toma tiempo y lleva consigo la interacción con otras instituciones del Estado.

Con un pronóstico estacional confiable, el ICE puede hacer las compras de combustibles fósiles de forma más controlada, con al menos dos meses de anticipación, que es el tiempo en el que se puede tener disponible el producto, y así evitar posibles apagones regulados. No obstante, se han hecho varios intentos de tener un pronóstico estacional fiable, pero la dificultad que impone el hecho de que, para este período, a diferencia de otras épocas del año, no se tiene una dependencia únicamente de los valores de índices oceánicos, sino también de índices atmosféricos que definan la llegada de empujes fríos al país, hace que esta época sea la más difícil de predecir.

La predicción del clima invernal mediante el uso de métodos estadísticos no ha brindado resultados satisfactorios para la institución. Por tanto, se decide el empleo de modelos dinámicos, específicamente la herramienta Climate Forecast System (CFS), para la cual se requiere primeramente una evaluación de su capacidad para representar aspectos del clima regional durante el período de interés y así tomar decisiones sobre su posible uso futuro.

1.2 Antecedentes

En los últimos años se ha intentado realizar pronósticos estacionales a nivel interno del ICE, usando distintos ejercicios estadísticos para mejorar la predicción del período invernal. Dentro de los esfuerzos que se han hecho, está el análisis de tablas de contingencia, tal y como Fallas y Alfaro (2012a) lo efectuaron para América Central como apoyo para el Foro Climático Centroamericano. Los autores, sin embargo, concluyeron que para el período invernal no se llegan a obtener significancias estadísticas tan altas como en otros períodos del año, como por ejemplo los meses de agosto, setiembre y octubre. También se ha usado como referencia el otro estudio de Fallas y Alfaro (2012b), como aplicación para el mencionado Foro, asociado al análisis canónico, pero los mejores resultados se obtienen igualmente para el trimestre de agosto, setiembre y octubre, siendo el período invernal precisamente el que presenta resultados con estadísticos más bajos.

La verificación que se ha hecho a nivel interno no ha dado resultados satisfactorios, esto en gran parte debido a la dependencia que se tiene para esta época, no solo de los índices oceánicos que se usan en los análisis mencionados, sino también de los índices atmosféricos tales como la Oscilación del Ártico (OA). Según Zárate (2013), valores negativos (positivos) de la OA favorecen las temporadas activas (inactivas) de empujes fríos. Dichos índices atmosféricos no cuentan con una relación de rezago buena que pueda ser utilizada para predicción, por lo que en este estudio se busca validar uno de los modelos climáticos que cuenta con salidas continuas cada 6 horas, para horizontes de tiempo de 9 meses. Esto permitiría hacer un seguimiento del comportamiento de las predicciones a medida que se acercan a la época de interés. El modelo seleccionado es el

CFS versión 2, el cual es global y presenta mejoras importantes, dentro de las cuales está el cambio de resolución y otras que se puntualizarán más adelante, que podrían ayudar a contar con un insumo que sirva de guía en el proceso de elaboración de predicciones climáticas estacionales para Costa Rica, especialmente durante la época invernal. Un aspecto que ayuda también en la validación del modelo es que cuenta con pronósticos retrospectivos desde mediados de la década de 1980, lo que permite conocer sus posibles sesgos. El presente trabajo sirvió para probar los resultados obtenidos durante la investigación en el invierno 2018 – 2019, cuyos resultados se discutirán más adelante. Una vez identificadas las capacidades del CFS, se podría plantear la realización de un proceso de reducción de escala con un modelo numérico regional, como el Weather Research and Forecasting Model (WRF), para representar procesos regionales y locales.

Capítulo 2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Validar sobre Costa Rica las predicciones climáticas para el invierno boreal (diciembre, enero y febrero), generadas por el modelo numérico global Climate Forecast System (CFS), a principios de los meses de setiembre, octubre y noviembre; esto con el fin de determinar la capacidad de este modelo de representar con cierta anticipación la distribución temporal y espacial de precipitación y viento en bajo nivel, principalmente en la Vertiente del Caribe, debido a la importancia que tiene esta región en la generación hidroeléctrica del país.

2.2 Objetivos específicos

- Generar las climatologías de precipitación y viento en bajo nivel a partir de predicciones del modelo CFS entre los años 1984 y 2017, tanto para el trimestre comprendido entre diciembre y febrero (estacional), como para cada mes de dicha época de manera individual.
- Comparar objetivamente las climatologías de precipitación y viento en bajo nivel modeladas con las obtenidas mediante información satelital y datos de reanálisis.
- Determinar con cuántos meses de anticipación es posible tener una mayor confianza en las predicciones del CFS para el clima invernal sobre Costa Rica y, en particular, sobre la Vertiente del Caribe.

Capítulo 3. Marco Teórico

3.1 Generalidades del clima en Costa Rica para el período invernal

Para los meses que comprende este estudio (diciembre, enero y febrero), las condiciones sobre el país son de época seca sobre la mayor parte de la Vertiente del Pacífico, mientras que para la Vertiente del Caribe se trata de los meses más lluviosos del año. Debido a que el presente estudio busca mejorar los pronósticos estacionales del período invernal para intereses del ICE, el mismo se concentra en la validación de la salida del modelo global CFS en la Vertiente del Caribe, que es donde se encuentran distintos embalses de aprovechamiento hidroeléctrico, para los cuales las precipitaciones de los meses indicados resultan ser muy importantes. La idea es optimizar el uso del recurso hidroeléctrico para mitigar o disminuir el uso de energía térmica, la cual es más cara para el país.

La Región Caribe y el sector montañoso de la Zona Norte del país se caracterizan por no contar con una época seca definida, ya que, si bien hay un descenso observable en las precipitaciones tanto en el sector montañoso, como sobre el sector costero para los meses de marzo y abril, en algunos años se han presentado incluso eventos extremos, como fue el caso de abril de 1970 (Rodríguez, 1970). Además, el descenso de precipitaciones que se genera en el sector costero del Caribe para los meses de setiembre y octubre, en promedio muestra acumulados mensuales que no pueden considerarse como de una época seca. Por otro lado, para los sectores montañosos, tanto en la Región Caribe como la Zona Norte, las precipitaciones se mantienen, debido a los aportes de humedad de los sistemas convectivos propios de la época tal y como se observa en la Figura 1. En esta misma figura se puede observar que en las zonas de Cachí y Arenal las precipitaciones son constantes a lo largo del año. Se observa, además a lo indicado anteriormente, que para julio en la zona de Arenal hay un aumento en la precipitación, mientras que para Cachí hay un ligero descenso, el cual está relacionado con la presencia del chorro de bajo nivel del Caribe, así como de la presencia de la canícula; finalmente para la zona de Arenal se observa una disminución de las precipitaciones menor a la observada en la cuenca de Cachí para los últimos meses del año.

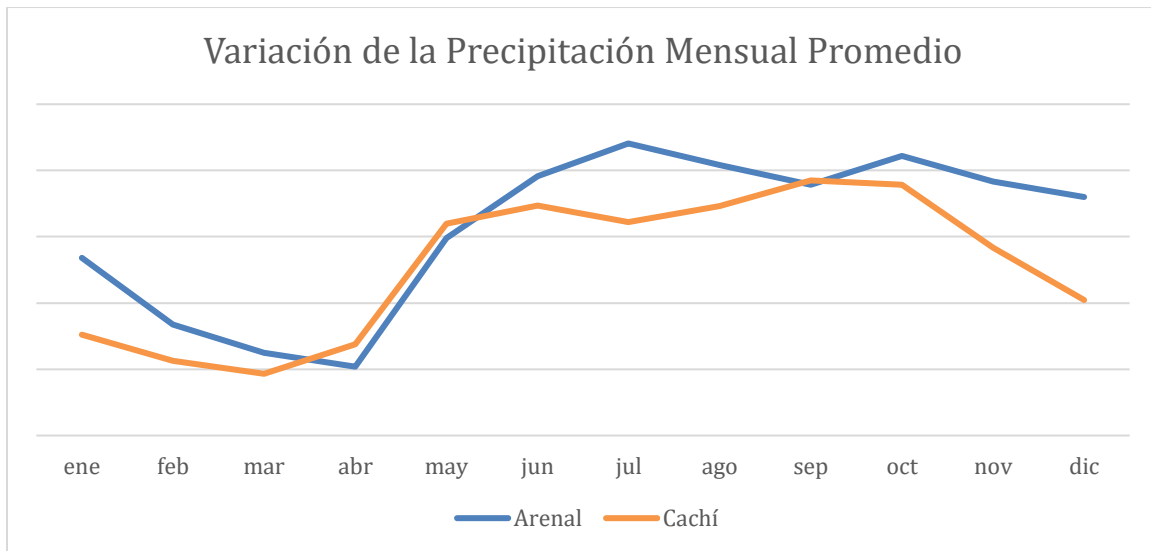


Figura 1. Variación de la precipitación mensual promedio, para la zona de Cachí y Arenal.¹

En cuanto a la época invernal, que es la época en la que se centra el presente estudio, las precipitaciones para la Región Caribe costera, incluye uno de los meses de más precipitaciones que es diciembre, mientras que, en los sectores montañosos, si bien las precipitaciones mensuales son altas, no representan los meses más lluviosos.

El patrón anteriormente mencionado está relacionado con la influencia de los empujes fríos sobre el país, así como el efecto de la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ, usando sus siglas en inglés), ya que si bien los trabajos de Amador (1998) y Amador y Magaña (1999) describieron el máximo que se presenta en los meses de la canícula, fue Amador (2008) quien observó un máximo secundario que se presenta para la época invernal, el cual según Amador et. al 2003, se había identificado que responde a las anomalías cálidas (frías) de las temperaturas superficiales del Océano Pacífico Tropical del Este con un CLLJ más débil (fuerte), lo cual es un patrón inverso a lo que normalmente ocurre con el máximo de verano.

¹ No se muestran las cantidades de precipitación debido a que la información es confidencial, debido a esto se hace solo una descripción del comportamiento en general de las cuencas mencionadas y de la importancia de la precipitación en estos sitios durante la época invernal para el ICE.

Capítulo 4. Datos, Herramientas y Métodos.

4.1 Datos.

A continuación se presenta una descripción de las bases de datos que se emplearon en esta investigación, para la evaluación de los pronósticos retrospectivos del modelo CFS versión 2, dentro de las cuales están los archivos de re-pronóstico (“reforecast”) de dicho modelo numérico en su versión 2, datos satelitales del Proyecto de Climatología Global de Precipitación (GPCP, en inglés), información de Precipitación Estimada de Manera Remota usando Redes Neuronales Artificiales (PERSIANN, en inglés), datos de Reanálisis del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL, en inglés) de la Administración Oceanográfica y Atmosférica Nacional (NOAA, en inglés) y datos de precipitación media de las cuencas de Arenal y Cachí, de la Base de datos de Hidrología (ICE).

4.1.1 Modelo Climate Forecast System (CFS).

Como se indicó anteriormente el modelo que se emplea en este trabajo es el CFS en su segunda versión; sin embargo, antes de detallar características relevantes de esta versión del modelo, hay que indicar que el CFS en su primera versión, entró en modo operativo a partir de agosto del 2004, a cargo de NOAA, como parte de un comunicado de prensa sobre la predicción de un nuevo fenómeno de El Niño.

El modelo en cuestión fue desarrollado por el Centro de Modelado Ambiental (EMC, en inglés) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, en inglés) y consistió en un modelo dinámico de vanguardia para predecir la evolución del sistema atmósfera – océano – tierra, en una escala de tiempo de meses. Esto brindó las bases para la mejora en las predicciones climáticas mensuales y estacionales. Según Saha et al. (2006), en su momento de creación, el CFS se definió para que usara el mismo modelo atmosférico básico que la versión del Global Forecast System (GFS, en inglés) del momento (configuración de mayo 2003), pero ejecutado con una resolución más baja. Se adoptó un truncamiento espectral triangular de 62 ondas (T62) en la horizontal (equivalentes a una rejilla Gaussiana de 200 kilómetros) y una diferenciación finita en la vertical de unos 64

niveles sigma. La componente oceánica es la versión 3 del modelo oceánico del GFDL (MOM3, Pacanowski and Griffies 1998), la cual resuelve las ecuaciones primitivas oceánicas mediante diferencias finitas, con las suposiciones de Boussinesq y aproximaciones hidrostáticas. El MOM3 usa coordenadas esféricas en la horizontal con rejilla espaciada tipo Arakawa B y una coordenada z en la vertical.

Junto con la creación del modelo hay varias mejoras relevantes al sistema de predicción dinámico. Por ejemplo, el acople atmósfera – océano es sobre casi todo el globo, lo que permite que las temperaturas superficiales del mar evolucionen con base en la dinámica oceánica, que incluye la fuerza del viento en la solución del modelo atmosférico. Dichas temperaturas superficiales del mar se acoplan a la atmósfera de forma tal que influye en la ubicación de la convección tropical. Si esto no existiera, el modelo climático no sería capaz de predecir la evolución del ciclo de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual genera importantes impactos en los patrones a nivel global. En la versión 1 del CFS se identificó que hay importantes tendencias húmedas en la zona tropical a la hora de pronosticar la época invernal (DEF); dichas tendencias aumentan conforme se amplía el rezago en la predicción de la precipitación.

En lo que respecta a la segunda versión del modelo, en su componente atmosférica sigue usando el GFS, con un truncamiento espectral triangular de 126 ondas (T126) en la horizontal (equivalente a cerca de 100 km de resolución espacial) y una diferenciación finita en la vertical con 64 niveles híbridos de presión sigma. En cuanto a la componente oceánica, la versión es la del MOM 4p0d (Griffies et al. 2004), la cual es una versión de diferencias finitas de las ecuaciones primitivas del océano configuradas bajo las aproximaciones de Boussinesq e hidrostáticas. El plano horizontal consiste en una rejilla espaciada tipo Arakawa B y una altura geométrica en la vertical, con una resolución zonal de medio grado y una resolución meridional de un cuarto de grado. Cuenta con 40 capas en la vertical, de las cuales 27 están en los 400 metros más superficiales, y la profundidad del fondo es de aproximadamente 4.5 km. Según Saha et al. (2010), el modelo CFS está programado para ejecutarse en paralelo. Existen tres programas ejecutables en el CFS: el modelo atmosférico (GFS), el modelo oceánico (MOM4) y el acoplador, donde cada cual tiene su propio flujo de información. Los tres operan de

manera independiente, pero intercambian información entre sí, de forma tal que el acoplador recibe datos de ambos modelos de la parte atmosférica y oceánica y envía la información que necesitan de regreso, respectivamente. En cada intervalo de avance en el tiempo que se realice, el acoplador recibirá varias variables del GFS, las cuales enviará al modelo oceánico, mientras que recibirá datos del modelo oceánico y de la parte del hielo marino, para enviarla de vuelta al GFS.

En el CFS, el modelo atmosférico posee una estructura de rejilla distinta a la empleada en el modelo oceánico y de hielo marino (MOM4, en ambos casos); sin embargo, usa la rejilla de la atmósfera simulada en el modelo oceánico. Además, las variables instantáneas y acumuladas son intercambiadas entre el GFS y el MOM4 (tanto para el modelo de hielo marino como el oceánico) por medio del acoplador. Las variables instantáneas del GFS hacia el modelo de hielo marino, incluyen la radiación de onda larga y corta descendente, así como la temperatura de la capa más baja del modelo, viento, humedad, presión y nieve precipitada. El conjunto de variables del GFS al océano incluye la radiación neta de onda corta y larga descendente, el flujo de calor latente y sensible, presión del viento y precipitación. Mientras que las variables enviadas del modelo de hielo marino y oceánico de regreso a la atmósfera son la temperatura superficial del mar, fracción de hielo marino, espesor y profundidad de la nieve (Saha et al. 2010).

En términos generales la segunda versión del CFS tiene una mayor habilidad en la predicción subestacional que la primera versión, a lo largo del año. En la Figura 2, tomada de Saha et al. 2014, se muestra el error sistemático medio anual para las variables de temperatura a 2 metros de altura, tasa de precipitación y temperaturas superficiales del mar, con unos tres meses de rezago. En dicha figura se muestran a la izquierda los resultados del CFS en su primera versión y a la derecha, el CFS en su segunda versión, correspondiente al período 2003 – 2010. Los encabezados muestran el valor promedio y la diferencia media cuadrática sobre el mapa. Como se puede notar, los tres parámetros tienen valores más bajos en la versión 2 del CFS, lo cual es una señal de que es un mejor modelo. Este avance está relacionado con los ajustes en las condiciones iniciales de la atmósfera tropical, así como la consistencia de la condición inicial y el modelo usado

para realizar los pronósticos. Sin embargo, el hecho que estos valores mejoren no significa que no haya regiones con errores sistemáticos grandes, como es apreciable en la predicción estacional de precipitación para las condiciones promedio mensuales sobre tierra en el hemisferio norte. En resumen, el CFS en su segunda versión no es mejor que la versión 1 para pronosticar lluvia en regiones continentales, a pesar de tener una mejor habilidad en pronosticar la precipitación sobre el océano (Saha et. al, 2014).

Annual Mean Systematic Error (1982–2009) for Lead 3

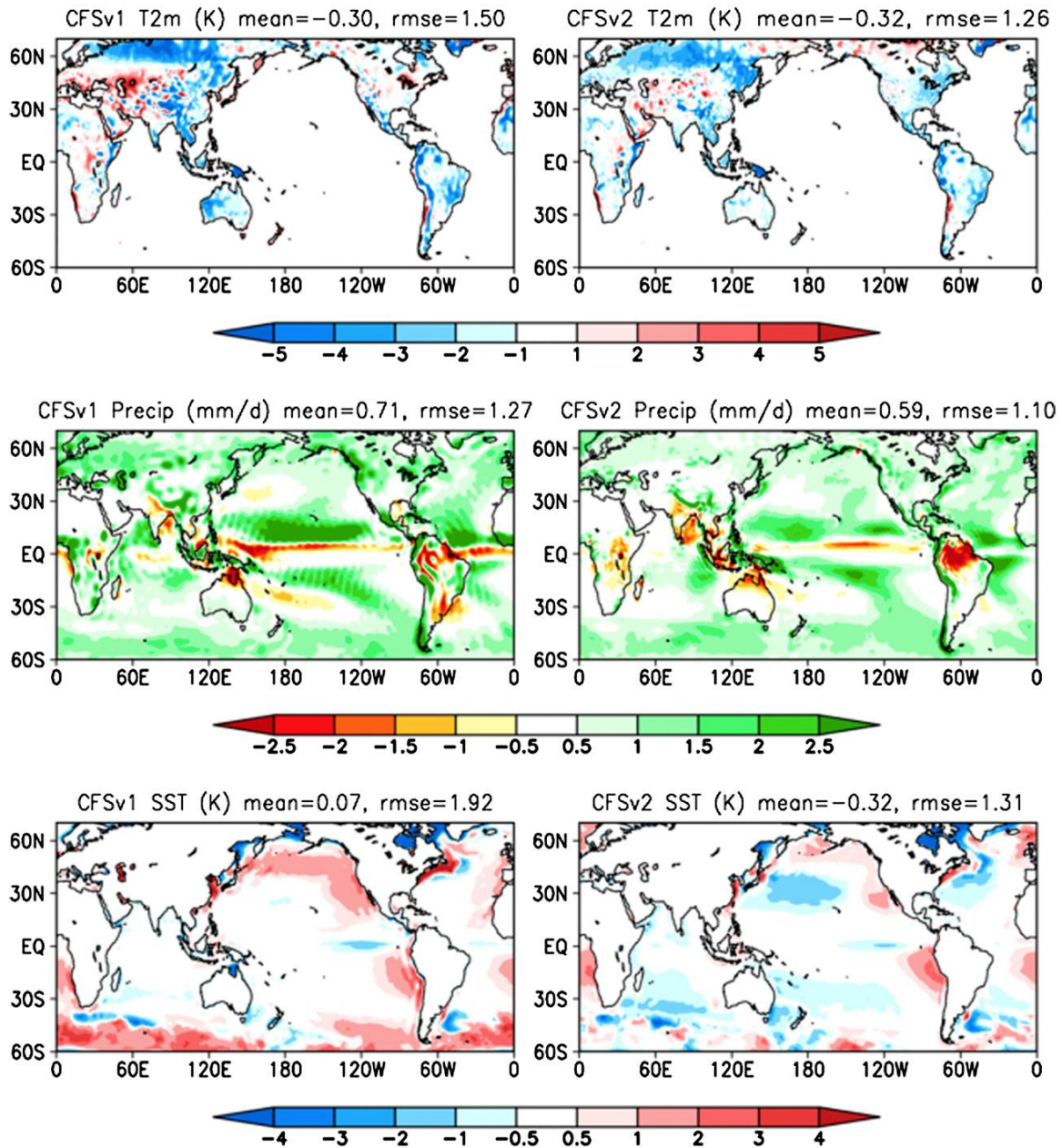


Figura 2. Error sistemático medio anual para tres parámetros (Temperatura a 2 metros de altura en grados Kelvin, tasa de precipitación en mm/día y temperatura superficial del mar en grados Kelvin) evaluados con un rezago de 3 meses, como la diferencia entre lo predicho y la climatología observada para el período completo de 1982 al 2009. Tomado de Saha et al. (2014).

4.1.2 Datos satelitales del Proyecto de Climatología Global de Precipitación (GPCP).

El conjunto de datos del GPCP de precipitación diaria con un grado de resolución, provee un acumulado a nivel global con una resolución de un grado en latitud y longitud iniciando en octubre del año 1996 y continuando hasta el presente. Usa principalmente imágenes satelitales geoestacionarias de infrarrojo para determinar la tasa de precipitación a nivel diario (Pendergrass, 2016).

El GPCP emplea el índice de precipitación de umbral emparejado (Threshold Matched Precipitation Index, en inglés), para obtener las estimaciones de las precipitaciones diarias, con la tasa condicional de precipitación basada en los datos de precipitación mensual local entre los 40 grados norte y sur. Para el resto del globo, el GPCP usa tasas de precipitación ajustadas, con base en sondeos verticales operacionales del TIROS (TOVS), así como del Sondeo Atmosférico Infrarrojo (AIRS, en inglés), según Pendergrass (2016).

Dentro de las fortalezas que tiene el GPCP a nivel diario es que, además de ser global, presenta una alta resolución tanto temporal como espacial en lo que se refiere al registro de precipitación. Por otro lado, una limitante clave en este conjunto de datos (al igual que todos los productos de precipitación satelital compuestos) es lo indirecto y complejo de la naturaleza de la precipitación, al asociar datos satelitales escasos con mediciones estimadas de precipitación para rejillas de alta resolución.

La información infrarroja geoestacionaria, la cual es una componente de entrada muy importante, mide las propiedades de la nube, en vez de registrar directamente la precipitación, esto porque los satélites sólo pueden medir de forma indirecta cantidades relacionadas con la tasa de precipitación en superficie. De ahí que los satélites de microondas e infrarrojo miden la temperatura de brillo, la cual es convertida en una tasa de precipitación de forma indirecta, mientras que por otro lado los radares miden la energía reflejada por la nube y las gotas de lluvia a través del espesor de la columna. Posteriormente, la información obtenida es usada como insumo para un algoritmo

complejo que produce estimados de tasa de precipitación de superficie en una rejilla regular en un tiempo y espacio determinado.

4.1.3 Datos Satelitales de Precipitación Estimada de Manera Remota usando Redes Neuronales Artificiales (PERSIANN).

Para poder evaluar los pronósticos del modelo CFSv2 se utilizaron productos de satélite de PERSIANN. Esto debido a que la información del modelo se encuentra con una resolución de aproximadamente 1° y estas estimaciones de satélite cuentan con una resolución de 0.25° en la banda comprendida entre las latitudes de los 60°S y 60°N . Desde la década de los años 60, se han creado distintas técnicas para la estimación de la lluvia en superficie, mediante la correlación entre la intensidad de la lluvia superficial con la temperatura de brillo del tope de las nubes provisto por el satélite. Una aproximación está basada en el análisis individual de la información de un píxel de nube, (Arkin y Meisner, 1987); procediendo a acumularlo posteriormente por varios días a un mes, para mitigar los errores haciendo una integración de área – tiempo y mejorar así la estimación.

Mientras que los sistemas de estimación satelital de lluvia se desarrollaban, para el año 1996 un nuevo enfoque basado en la fortaleza computacional y la flexibilidad de adaptarse de las Redes Neuronales Artificiales era presentado en la Universidad de Arizona. Dicho enfoque (PERSIANN), fue diseñado para que fuera capaz de extraer y combinar la información de distintos tipos de datos, incluyendo las imágenes satelitales de infrarrojo y microonda, estaciones en tierra, datos de radares en tierra e información topográfica superficial. La característica adaptativa del método permite actualizar de manera recursiva los parámetros de las Redes Neuronales Artificiales cuando hay datos disponibles en tierra, para así mejorar dramáticamente el rendimiento de las estimaciones en respuesta a la variación espacial y temporal de las lluvias. Esto le permite al modelo ajustarse efectivamente a las diferentes características de la precipitación para diversas regiones geográficas (Hsu et al. 1997). Posteriormente, como parte de los procesos de mejora de este conjunto de datos, Sorooshian et al. (2000) incluyen las imágenes de la misión de medición de lluvia tropical (TRMM, por sus siglas en inglés) y evalúan el desempeño de un algoritmo que incorpora las imágenes de infrarrojo de alta frecuencia

(hasta 48 por día) de satélites geoestacionarios, con las estimaciones de lluvia instantánea de baja frecuencia (de 1 a 2 por día), provistas por el satélite TRMM, para obtener un producto de precipitación mejorado en su resolución tanto espacial como temporal. Lo anterior debido a que varios experimentos habían demostrado que diferentes tipos de nubes pueden tener temperaturas en el tope de las nubes similares, pero con diferentes montos de precipitación en tierra.

Con la inclusión del TRMM, el sistema pasaba a operar de dos formas: en modo simulación y en modo actualización. En el modo simulación la tasa de lluvia superficial con 0.25° de resolución es estimada cada 30 minutos de las imágenes de infrarrojo de los satélites geoestacionarios, usando la función de mapeo de la red neuronal previamente calibrada. En el modo actualización, el error de simulación en cualquier píxel para el cual esté disponible un estimado de la lluvia instantánea es usado para ajustar los parámetros asociados a la función de mapeo. En resumen, el modo de simulación pasaba a generar la tasa de precipitación regular y el modo actualización mejoraba la calidad del producto.

En general, los algoritmos de estimación de precipitación satelital de alta resolución dependen de la sinergia entre una calidad superior e infrecuente de observaciones tomadas con sensores de microondas pasivos o activos a bordo de satélites de órbita terrestre baja y a una amplia tasa de muestreos relacionados con el canal infrarrojo de satélites geoestacionarios (Ashouri et al. 2015). Dentro de estos ejemplos de algoritmos y productos se encuentra la Técnica de Transformación del Centro de Predicción Climática (CPC) de NOAA (el CMORPH; Joyce et al. 2004), que genera análisis de precipitación global cada media hora a partir del año 2002, con resolución espacial de 8 km, basado en los satélites de microondas pasivos o activos de órbita baja y observaciones de distintas fuentes, tales como del Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa (DMSP), los satélites de NOAA (15, 16, 17 y 18), Aqua y TRMM. Otro ejemplo es el Análisis de Precipitación Multisatelital con TRMM (TMPA; Huffman et al. 2007), que cuenta con información cada 3 horas y una resolución espacial de 0.25° , iniciando en enero de 1998; por otro lado también está el conjunto de estimaciones satelitales del Laboratorio de Investigación Naval (NRL, en inglés; Turk et al. 2010), basado tanto en información geoestacionaria visible como infrarroja, así como en observaciones de microondas,

generando un producto con acumulados de precipitación de 0.25° en 3 horas, iniciando en enero del 2004. Finalmente se encuentra PERSIANN (Hsu et al. 1997, 1999), usada en el presente estudio, la cual usa la temperatura de brillo del infrarrojo tomada de satélites geoestacionarios para estimar la tasa de precipitación, actualizando sus parámetros mediante el uso de observaciones pasivas de microondas provenientes de satélites de órbita baja. Este producto genera datos cada media hora, con una resolución espacial de 0.25° y está disponible desde marzo de 2000. Dentro de los algoritmos de alta resolución de estimación de la precipitación basados en satélites, el PERSIANN es el que tiene una dependencia primaria en información infrarroja, que data del año 1979, lo cual la hace muy apropiada para generar información histórica de las últimas décadas.

Según Ashouri et al. (2015), asociado al Proyecto de Climatología de Nubes Satelital Internacional (ISCCP, por sus siglas en inglés), se cuenta con todas las observaciones geoestacionarias globales (Knapp 2008a), de todos los canales de satélites que incluye la serie GOES, los europeos (Meteosat), los japoneses (GMS) y los chinos (FY2). El ISCCP cuenta con un registro de datos de brillo de temperatura de fuentes geoestacionarias que cubre desde el año 1979, con resoluciones de 10 km en intervalos de 3 horas. Los datos en rejilla satelital llamados GridSat-B1, se derivan de dicho proyecto (Knapp et al. 2011), y proveen una cobertura casi global de datos para tres canales: el visible, la ventana del infrarrojo y el infrarrojo de vapor de agua. El principal insumo de entrada para el modelo PERSIANN-B1, son los datos de la ventana del infrarrojo que son combinados con las observaciones de cada punto de rejilla y ajustados a diferentes sesgos en los sensores satelitales (Knapp 2008b). Por otro lado, se cuenta con información del Proyecto GPCP. En el caso específico de la corrección del sesgo que se hace a las estimaciones de precipitación del PERSIANN, se usa el producto mensual de este último, con una resolución de 2.5° .

Es a partir de lo anterior que se genera el producto de precipitación PERSIANN-CDR (CDR, por sus siglas en inglés, que significa Registro de Datos Climáticos), cuyo objetivo es ser consistente, de larga duración, de alta resolución espacial y de una amplia cobertura global para realizar estudios de las características temporales y espaciales de la precipitación. Ashouri et al. (2015), muestran la forma en la que el algoritmo de

PERSIANN es aplicado al archivo histórico de las observaciones del Gridsat-B1 y se usa el producto mensual del GPCP para corregir el sesgo de las estimaciones de precipitación del PERSIANN-B1 (versión sin usar los satélites de microondas ni aplicar las correcciones del sesgo). En esta versión el algoritmo usa un modelo de red neuronal artificial para extraer los píxeles de las nubes frías y sus características circundantes, a partir de los datos del infrarrojo de onda larga y asociarlo así a variaciones en cada uno de los brillos de temperatura del píxel, con el fin de estimar la tasa de precipitación en dicho píxel. Posteriormente la información de los satélites de órbita baja con sensores de microonda pasivos y los datos de infrarrojo de satélites geoestacionarios unidos, son procesados en una resolución espacial de 0.25° .

En el caso de la versión CDR del PERSIANN, para eliminar la necesidad de observaciones de satélites de microonda, se entrenan y se mantienen fijos los parámetros de la regresión no lineal del modelo de las redes neuronales artificiales, para que pueda ser usado en retrospectiva usando datos del GridSat-B1. Además, se incluye una etapa de ajuste del sesgo basado en la versión mensual del GPCP con una resolución de 2.5° , como parte del proceso de reconstrucción. Un esquema simplificado del proceso se muestra en la Figura 3.

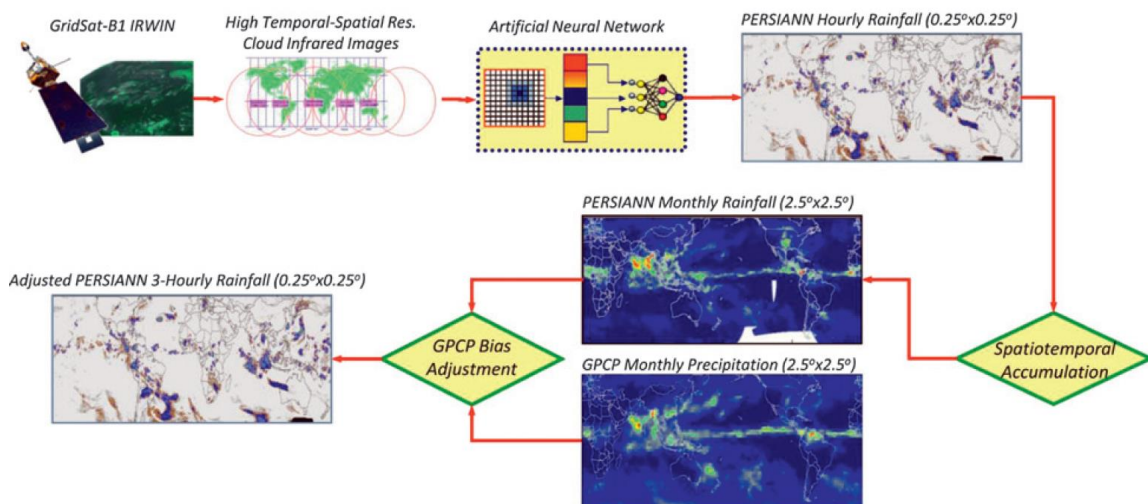


Figura 3. Esquema del algoritmo PERSIANN – CDR para reconstruir el histórico de precipitación. Tomado de Ashouri et al. 2015.

4.1.4 Datos de Reanálisis de Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL) de NOAA.

Se usaron los datos mensuales del reanálisis NCEP/NCAR para generar la climatología de la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe, correspondiente a los meses de diciembre, enero y febrero y así, compararla con la obtenida a través del modelo CFSv2.

4.1.5 Base de datos de Hidrología (Instituto Costarricense de Electricidad).

Se utilizaron los datos de precipitación media por área de las cuencas Cachí y Arenal, cuyos registros mensuales se usaron iniciando en diciembre de 1984 hasta febrero de 2018.

4.2 Herramientas

Dentro de las herramientas utilizadas en el presente trabajo, están el Climate Data Operators (CDO), la Tabla de Contingencia y el Grid Analysis and Display System (GrADS), los cuales se describen en detalle a continuación.

4.2.1 Climate Data Operators (CDO).

Esta herramienta es utilizada para poder realizar operaciones sobre las imágenes satelitales y el modelo fue el software Climate Data Operators (CDO, 2018), el cual es una colección de operadores para el procesamiento de datos climáticos y de modelos de pronóstico. Los operadores incluyen funciones estadísticas simples y aritméticas, selección de datos, herramientas de submuestreo e interpolación espacial. Cuenta además con las mismas funciones de procesamiento para los datos GRIB y NetCDF en un solo paquete.

4.2.2 Tabla de Contingencia

Otra herramienta importante en este trabajo, fue la tabla de contingencia, desarrollada por Alfaro et al. (2003), en donde se menciona que un número alto de categorías es difícil de interpretar por el gran número de posibilidades a considerar y que sería necesario un

número muy grande de datos para lograr un análisis estable de las $M \times N$ categorías. Al dividir las dos variables en terciles, es decir, haciendo $M = N = 3$, se obtienen 9 categorías conjuntas que permiten cierto grado de resolución y un número manejable de posibilidades. Por otro lado, una manera pragmática de enfocar la selección de 3×3 es que frecuentemente se busca un pronóstico que sea entendido fácilmente por el público en general usando conceptos tales como: normal, arriba de lo normal y abajo de lo normal, tal y como es el caso específico de este trabajo. Debido a lo anterior, en la tabla de contingencia, las variables, tanto predictoras como a pronosticar, son divididas en terciles, para así definir escenarios dentro de lo normal, arriba de lo normal o por debajo de lo normal. Las observaciones serán divididas por el programa de la tabla de contingencia y cada una debe pertenecer a una categoría y las tres categorías agotan todas las posibilidades dentro de la muestra o conjunto de observaciones tomadas.

Para analizar los distintos casos, en el presente estudio, se procedió a usar los pronósticos del modelo CFS como variables independientes, mientras que los valores de las precipitaciones estimadas por satélite y las lluvias medias por área de las cuencas de Arenal y Cachí, representaron la variable dependiente.

4.2.3 Grid Analysis and Display System (GrADS)

Para la elaboración de todos los gráficos se utilizó GrADS, la cual es una herramienta de escritorio interactiva usada por su fácil acceso, visualización y manipulación de datos. Puede trabajar tanto con datos en rejilla, como con datos de estaciones. Las operaciones son ejecutadas de manera interactiva mediante comandos similares a los de FORTRAN. Esta herramienta cuenta además con una interfaz programable, mediante secuencias de comandos (“scripts”), que permite realizar análisis más sofisticados, así como desplegar aplicaciones. Para el presente estudio se trabajaron datos NetCDF.

4.3 Métodos

Se procedió a la descarga de los pronósticos del modelo CFSv2 para los meses de diciembre, enero y febrero (DEF), inicializados el segundo o tercer día del mes de

setiembre, octubre y noviembre, respectivamente. Se analizó el comportamiento mensual y estacional (trimestre completo) del modelo. Una vez obtenidos los archivos se procedió a convertirlos a formato NetCDF, para un manejo más fácil con la herramienta CDO y se calcularon los promedios y acumulados estacionales. Seguidamente, se extrajo de cada archivo la variable a trabajar para disminuir el tamaño y facilitar la realización de los cálculos correspondientes.

Por otra parte, se descargaron los datos diarios del conjunto de datos del GPCP y PERSIANN para generar, a través de la herramienta CDO, los archivos mensuales de precipitación estimada con satélite. Posteriormente se agruparon los datos diarios en datos mensuales para los meses correspondientes al estudio (DEF) durante los años 2011 a 2017, que era el período que se sabía inicialmente que existía del modelo CFS. Conforme se avanzó en la investigación, se reconoció la existencia de una serie de pronósticos retrospectivos que permiten una mejor validación, ya que se incrementó el tamaño de la muestra a analizar en este trabajo. Se obtuvieron los archivos del GPCP disponibles (desde el año 1996), así como del PERSIANN y del CFS retrospectivo desde el año 1984, lo que permitió generar una climatología tanto de productos de satélite GPCP y PERSIANN, como del CFS para el trimestre de estudio y para cada mes de manera individual. Con este paso se buscaba definir con cuál conjunto de datos de precipitación trabajar, si con el GPCP que tenía una resolución igual a la del modelo CFS o con el conjunto de datos del PERSIANN con una resolución mayor.

Según Pendergrass (2016), para comparar dos conjuntos de datos en rejillas con diferentes resoluciones, primero se debe ajustar uno o ambos conjuntos de datos a una rejilla en común, usando un método que conserve la cantidad total de precipitación cayendo en un área. Frecuentemente la interpolación más usada es la bilineal, la cual fue usada con la herramienta CDO. Debido a que los archivos de precipitación satelital para el caso del PERSIANN contaba con una resolución de 0.25 grados y las salidas del modelo con 1 grado, se efectuó una interpolación bilineal para pasar los datos satelitales a la resolución de las salidas del modelo. Después, se calculó la diferencia entre los datos del modelo y los datos de precipitación satelital, para identificar sesgos (positivos o negativos) en la precipitación del CFSv2 sobre la región de interés y para la época de

invierno boreal. La validación de la predicción de lluvia en el trimestre DEF se realizó para cada año disponible, haciendo la diferencia entre la salida del modelo CFS inicializada el primer día disponible de los meses de setiembre, octubre y noviembre y el dato mensual de precipitación según PERSIANN. Esto se hizo para el trimestre completo, así como para cada mes de la estación a predecir por separado.

Posteriormente se escogió la rejilla del modelo CFS que cubriera la región noreste de la Vertiente del Caribe del país (figura 4), usando el comando `selindexbox` en CDO y se extrajo el promedio por área de los valores de precipitación en formato NetCDF (comando `fldmean` de CDO). Consecutivamente se usó el comando `outputtab`, para extraer los valores de las rejillas promediadas y así generar una serie de tiempo con todos los archivos CFS disponibles, para usarlos en la tabla de contingencia como los valores de la variable independiente. En este punto de la investigación ya se tenía claro que el modelo tenía una sobreestimación de la precipitación en los pronósticos; sin embargo, la idea de trabajar los archivos de los modelos con los datos de satélite, fue para saber si existía una correspondencia entre el tercil alto (bajo) del pronóstico del modelo CFS y el tercil alto (bajo) de PERSIANN, lo cual permitiría determinar si, a pesar de existir un sesgo húmedo, el modelo es útil para identificar (al menos desde su marco de referencia), épocas invernales más o menos lluviosas sobre el Caribe de Costa Rica.



Figura 4. Región cubierta por la información usada del modelo CFS, para comparar con los datos de precipitación del PERSIANN y de la lluvia media por área de las cuencas Arenal y Cachí.

Paralelo a lo anterior, también se realizó una validación de la representación de la corriente en chorro en bajo nivel en el CFSv2, por lo que se extrajeron los archivos correspondientes a la componente zonal del viento en el nivel de 925 hPa (U925) durante el período 1984 al 2017, para compararla con los datos del reanálisis.

Finalmente, se procedió a realizar la misma comparación entre los datos del modelo CFS y las lluvias medias por área de las cuencas de Arenal y Cachí, las cuales son muy importantes para generar energía hidroeléctrica durante el estiaje en la Región del Caribe y la Zona Norte.

5. Resultados

El primer resultado obtenido fue el comparar las climatologías entre los dos conjuntos de datos que se habían escogido para trabajar y comparar con el modelo CFS. A continuación, se muestran los mapas (figura 5) con las precipitaciones promedio históricas de los meses de diciembre, enero y febrero, para los datos satelitales del GPCP (período 1996 - 2018) y del PERSIANN (1984 - 2018).

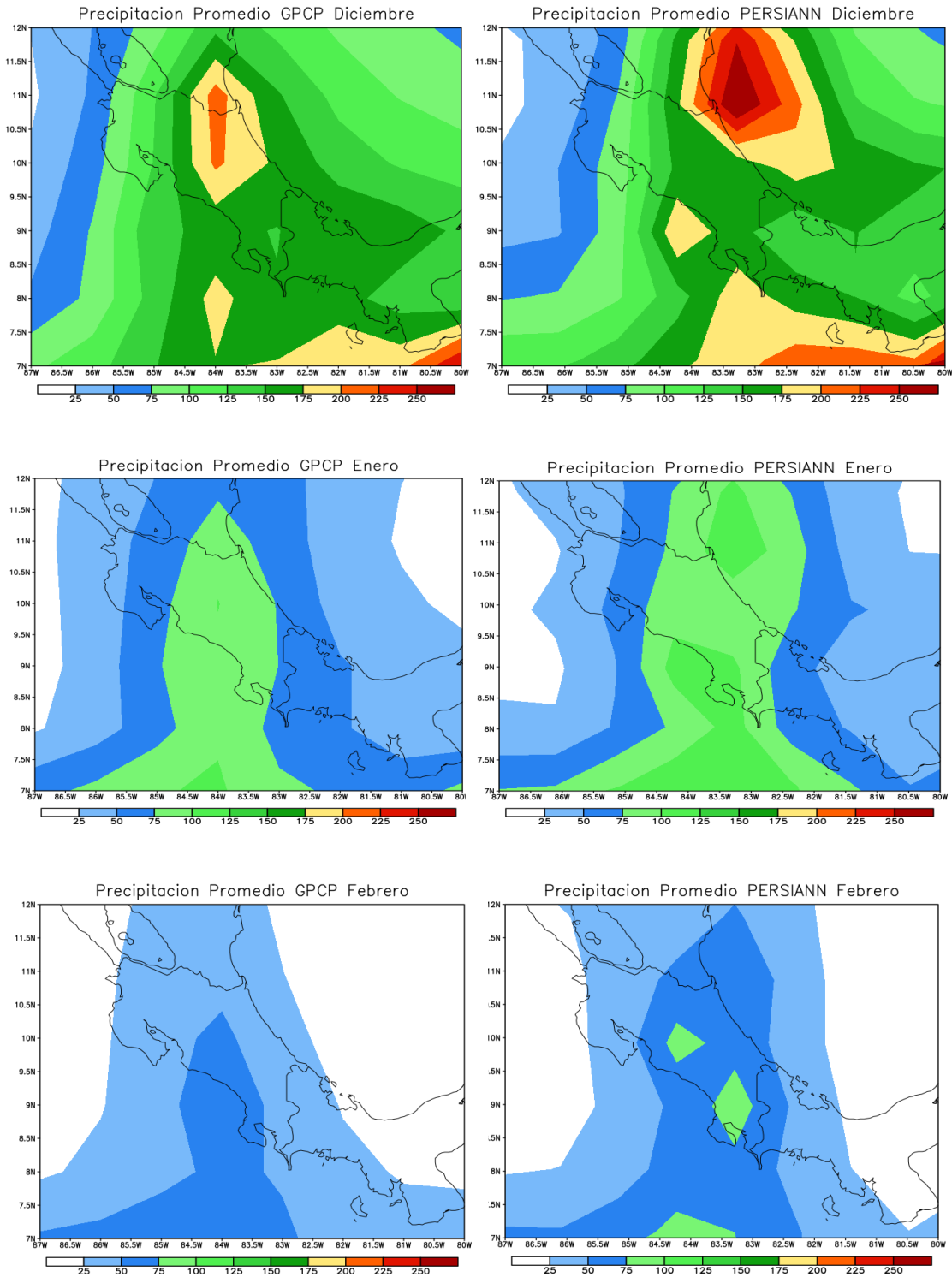


Figura 5. Precipitación promedio (mm) para los meses de diciembre, enero y febrero GPCP (izquierda) y PERSIANN (derecha).

Se puede observar en la figura 5, que la estimación satelital de un grado de resolución, correspondiente al GPCP, muestra una seria deficiencia en la cual no ubica los máximos donde se esperarían para la época del año y además de eso la precipitación no supera los 200 mm sobre la zona de estudio.

Por otro lado, en el caso de las imágenes asociadas al PERSIANN, se identifican mejor las zonas del país donde más llueve para estos meses; sin embargo, sí se nota una importante subestimación en la cantidad de precipitación, comparándolo con las imágenes del Atlas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2009). Por ejemplo, para la zona más lluviosa de la costa Caribe (Tortuguero), debido al máximo del chorro en la época invernal, se encuentran valores apenas cercanos a los 250 mm en PERSIANN, cuando en dicho Atlas se muestra que, para ese mes, los valores de esa zona deberían superar los 500 mm e incluso alcanzar hasta 700 mm. De igual forma para el mes de enero, se muestra que los valores deberían ser cercanos a los 500 mm, mientras que la estimación del PERSIANN, muestra valores de apenas 100 mm. Finalmente en el caso de febrero, los valores en dicha región deberían estar por encima de 300 mm y los valores de PERSIANN no llegan a los 70 mm.

Debido a que ambos sistemas de estimación satelital utilizan el infrarrojo para obtener la precipitación y a que para el período de estudio en su mayoría está asociada a nubes cálidas y no a sistemas convectivos, es posible que ninguno de los dos algoritmos capture correctamente la distribución espacial. La corrección que realiza el PERSIANN con datos de satélites de microondas, podría permitirle ubicar las zonas de mayor precipitación. Un aspecto interesante es que para el mes de febrero se observan máximos en la costa del Pacífico, los cuales tienen su origen en precipitaciones convectivas. Esto reforzaría la hipótesis de que las precipitaciones de nubes cálidas no son bien estimadas por ninguno de los dos algoritmos.

A pesar de lo anterior se escogió trabajar con los datos del PERSIANN, a sabiendas de que en términos generales presenta subestimación de las precipitaciones para la Región del Caribe, pero que al menos identifica las zonas con más precipitación.

5.1 Diferencias entre los pronósticos del modelo CFSv2 y las estimaciones satelitales (PERSIANN)

5.1.1 Setiembre para el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF)

Revisando el pronóstico de las salidas del modelo CFSv2 en los meses de setiembre de cada año de forma individual, para el pronóstico del período DEF (iniciando en diciembre del mismo año que setiembre), se identificaron los años en que mejor se representaron las precipitaciones sobre el país para el trimestre en cuestión (definiendo unos 200 mm como umbral, entre el pronóstico del modelo y las imágenes PERSIANN de esos meses, sobre la región Caribe de Costa Rica). El promedio de la diferencia de los mejores años (1984, 1986, 1993, 1994, 1996, 1998, 2000, 2003, 2004, 2013, 2014 y 2015) se muestra en la figura 6.

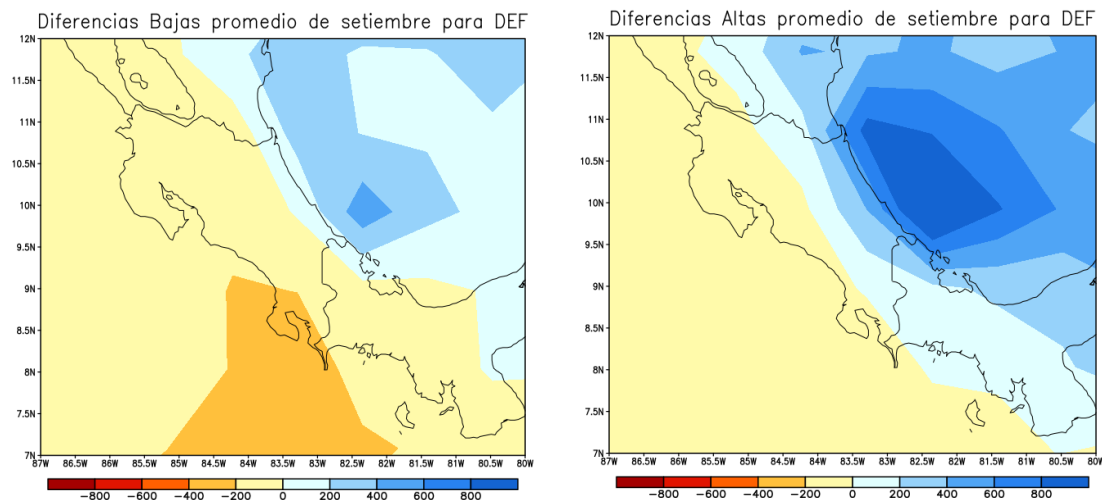


Figura 6. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de setiembre del CFSv2 para el período Diciembre, Enero y Febrero (DEF) y la estimación satelital de PERSIANN.

Para otros años, se observa una importante sobreestimación en las precipitaciones que se generan en la costa Caribe del país, llegando a valores que incluso superan los 1000 mm (Figura 6). Esta es una característica presente en el modelo a lo largo de prácticamente todos los meses evaluados. Los pronósticos de época invernal inicializados en setiembre de 1988 y 1990, muestran sesgos positivos que alcanzan los 1200 mm, siendo de los más altos.

5.1.2 Octubre para el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF)

En el caso del mes de octubre para la diferencia promedio entre el pronóstico del modelo y la estimación satelital del PERSIANN para la estación DEF (definiendo como un umbral un valor de 200 mm para los años con menor diferencia), se utilizaron los años 1986, 1997, 1999, 2002, 2006 y 2012, el cual se muestra en la figura 6, mientras que el año 2015 fue el que mostró una mayor diferencia, con valores de hasta 1100 mm (figura 7).

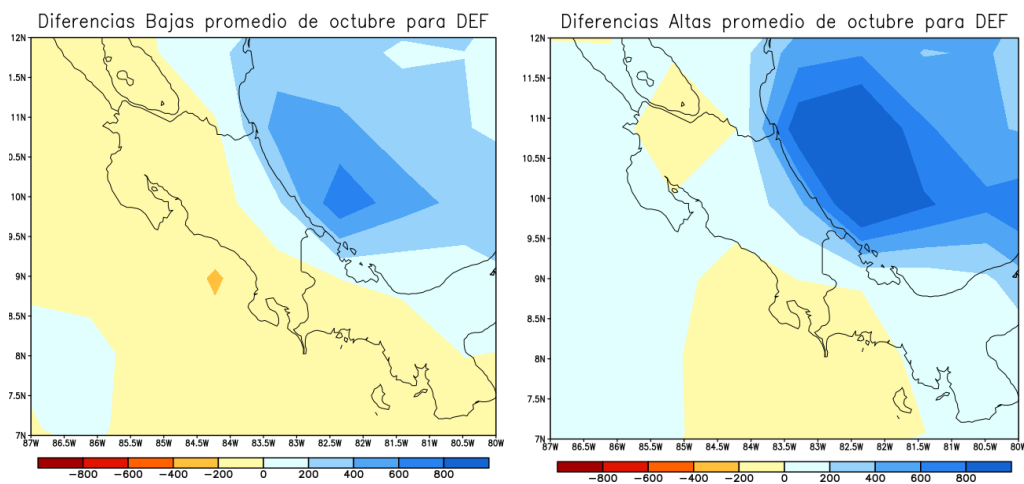


Figura 7. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de octubre del CFSv2 para el período Diciembre, Enero y Febrero (DEF) y la estimación satelital de PERSIANN.

5.1.3 Noviembre para el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF)

En lo que respecta a las predicciones de noviembre, los pronósticos más cercanos a las estimaciones satelitales, en los cuales las diferencias como umbral se definieron en los

200 mm y se muestran como el promedio de la diferencia de los años 1984, 1991, 1992, 1993, 1996, 1997, 2004 y 2006 en la figura 8.

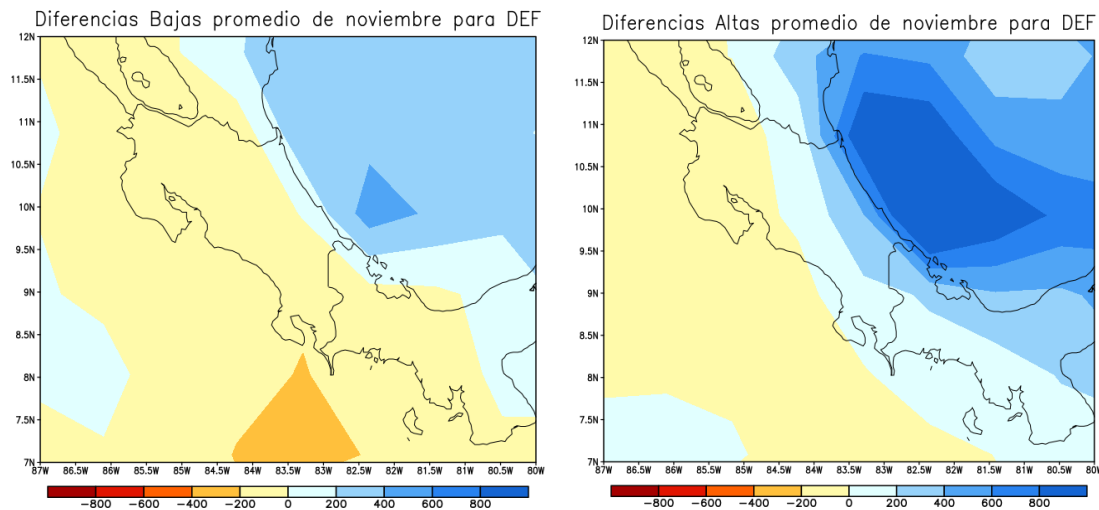


Figura 8. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de noviembre del CFSv2 para el período Diciembre, Enero y Febrero (DEF) y la estimación satelital de PERSIANN.

Es para los años 2011, 2012 y 2016, que se observan los valores más altos de sobre estimación, con diferencias de hasta 1200 mm. Para estos casos, el promedio de las diferencias entre el pronóstico del modelo y la estimación satelital se muestran en la figura 7.

Posteriormente se realizó la validación directamente mes a mes, por lo que se inició validando el comportamiento de la salida del modelo en el mes de setiembre para los meses de diciembre, enero y febrero, posteriormente las salidas de los meses de octubre y noviembre, cuyos resultados se muestran detalladamente en el anexo. En resumen, se observó que las predicciones para la precipitación del modelo para diciembre y enero, cuando presentaban discrepancias altas diferían en los tres meses de pronóstico en al menos 300 mm de las estimaciones que hace el PERSIANN, mientras que cuando las diferencias eran menores, estas podían ser de menos de 50 mm. Para el caso de los pronósticos para febrero, las diferencias entre la predicción del modelo y la estimación del PERSIANN disminuyeron, lo cual probablemente esté asociado a que las precipitaciones de este mes son menores que las de los meses de diciembre y enero.

5.2 Corriente en chorro de bajo nivel del Caribe

Para el análisis de la corriente en chorro de bajo nivel, se calculó la climatología del mismo período de estudio (1984 a 2017), para lo cual se usaron los Datos de Reanálisis del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL por sus siglas en inglés) de NOAA. El análisis se efectuó sobre la región del núcleo de la corriente en chorro, según el índice definido por Amador (2008), el cual va de los 12.5°N a los 17.5°N, así como de los 75°O a los 80°O.

Se observó que el modelo CFSv2, tiende a subestimar la intensidad del chorro de bajo nivel del Caribe, tal y como se muestra en la tabla 1. En promedio los valores de subestimación son mayores en los pronósticos realizados por el modelo en el mes de setiembre y menores en los pronósticos realizados en el mes de octubre.

Tabla 1. Valores promedios históricos de la intensidad del chorro (m/s) según datos de Reanálisis y los pronósticos del CFSv2, para distintos meses de predicción.

	Diciembre	Enero	Febrero
Valor Promedio del Reanálisis	-10.69	-11.05	-10.52
Valor Promedio del Pronóstico de setiembre	-8.63	-8.47	-9.06
Valor Promedio del Pronóstico de octubre	-9.80	-9.69	-10.69
Valor Promedio del Pronóstico de noviembre	-9.75	-9.44	-9.63

Por otro lado, haciendo un análisis más exhaustivo por cada año, se puede observar en la figura 9, el comportamiento de cada uno de los pronósticos realizados por el CFSv2 para el chorro y cómo se comparan con los valores de cada año de parte del Reanálisis.

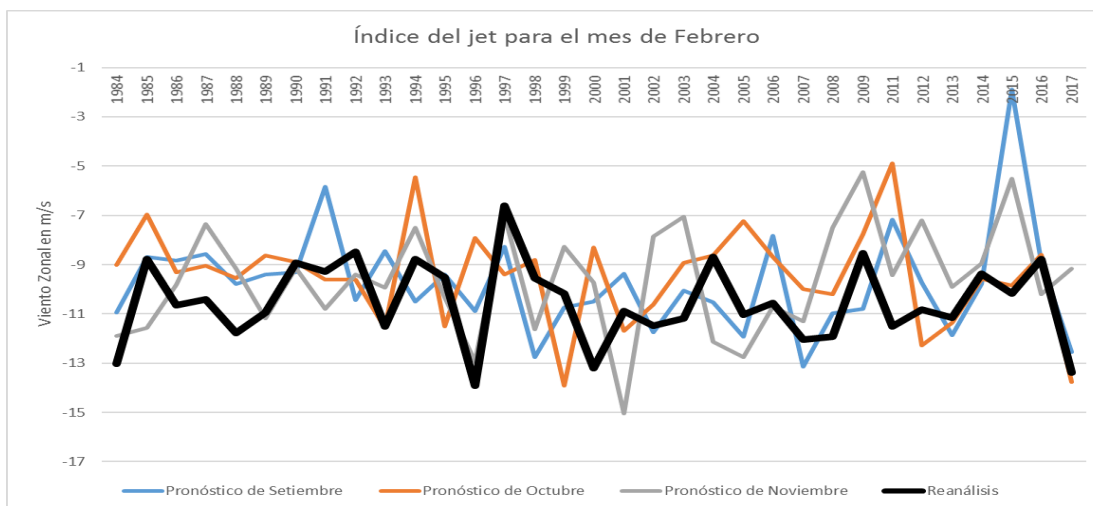
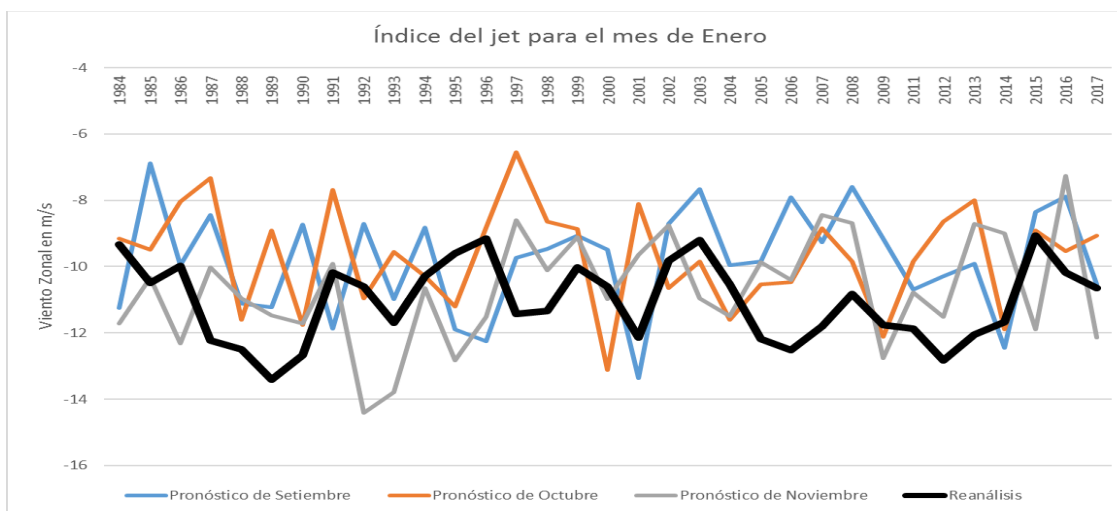
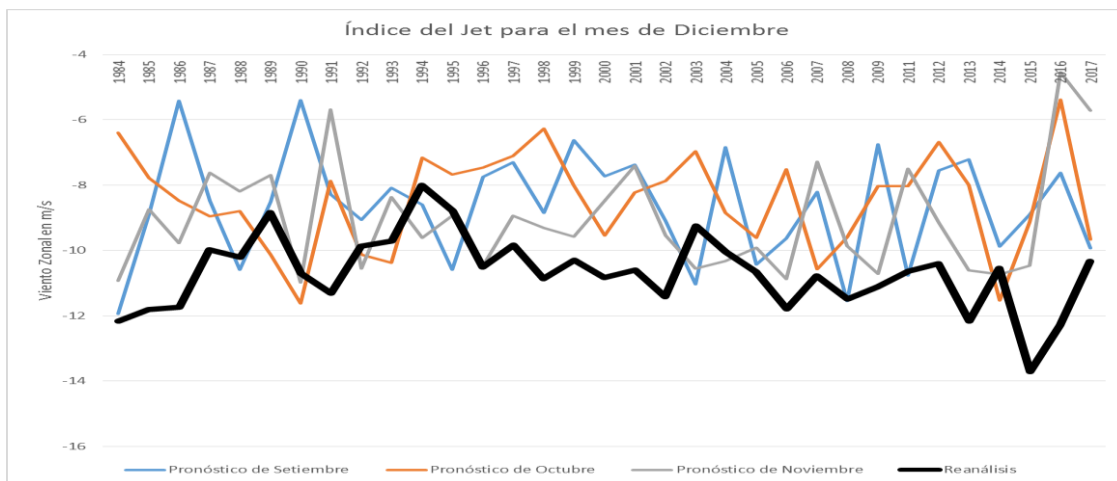


Figura 9. Comportamiento de cada uno de los pronósticos de la corriente en chorro del Caribe por el modelo CFSv2 y el comportamiento histórico según el Reanálisis.

Como se puede notar, existe mucha dispersión en los pronósticos del modelo con respecto a los datos del Reanálisis para los distintos meses de pronóstico. Además, es muy notoria la constante subestimación de la corriente en chorro, lo cual se presenta en un menor grado para el mes de febrero.

Posteriormente se pasó a hacer una revisión de los años con condiciones de El Niño y La Niña, para determinar si el modelo al menos capturaba el comportamiento esperado e indicado por Amador (2008), en donde ocurre lo contrario a lo que se observa en verano, ya que la corriente en chorro del Caribe, muestra valores más bajos cuando hay condiciones de El Niño y más altos en condiciones de La Niña. Los años asociados al ENOS, fueron definidos según el índice ONI de la NOAA y cuenta con 11 años El Niño y 12 años La Niña, que ocurrieron durante el período de estudio que va del año 1984 al 2017.

Como se puede notar en la tabla 2, en los resultados obtenidos para los años El Niño, se muestra que el modelo pronostica en los meses de setiembre, en promedio, un chorro más débil para diciembre y enero, no así para febrero, mientras que, por otro lado, pronostica en los meses de octubre y noviembre, un chorro más débil para tres meses de estudio.

Tabla 2. Valores promedios históricos de la intensidad del chorro (m/s) según datos de Reanálisis y los pronósticos del CFSv2, para años El Niño.

	Diciembre	Enero	Febrero
Valores Promedios para años Niño según Reanálisis	-10.86	-10.86	-9.50
Valor Promedio del Pronóstico para años Niño de setiembre	-8.10	-8.41	-9.48
Valor Promedio del Pronóstico para años Niño de octubre	-9.58	-9.59	-10.53
Valor Promedio del Pronóstico para años Niño de noviembre	-8.60	-8.91	-8.44

En la tabla 3 se muestran los pronósticos del modelo CFSv2 para los años La Niña, en donde se puede observar que los pronósticos del mes de setiembre presentan una corriente en chorro más fuerte para el mes de diciembre, no así para enero y febrero. En el caso de los pronósticos del mes de octubre, se observa en promedio una corriente en chorro más fuerte para los meses de diciembre y enero, pero no para febrero. Finalmente, en los pronósticos del mes de noviembre, sí se muestran magnitudes más fuertes asociadas al chorro, en los tres meses de pronóstico.

Tabla 3. Valores promedios históricos de la intensidad del chorro (m/s) según datos de Reanálisis y los pronósticos del CFSv2, para años La Niña.

	Diciembre	Enero	Febrero
Valores Promedios para años Niña según Reanálisis	-10.78	-10.91	-11.33
Valor Promedio del Pronóstico para años Niña de setiembre	-9.57	-8.30	-8.35
Valor Promedio del Pronóstico para años Niña de octubre	-9.84	-10.02	-10.24
Valor Promedio del Pronóstico para años Niña de noviembre	-10.73	-9.65	-10.11

5.3 Tabla de Contingencia

Como se mencionó en la metodología, una vez obtenidas las diferencias entre los pronósticos de los modelos y las estimaciones satelitales, se determinó la coincidencia entre la ocurrencia de épocas invernales con precipitación normal, encima de lo normal o bajo de lo normal en el modelo CFSv2 y lo observado a partir de datos satelitales y de estaciones meteorológicas que dan como resultado la lluvia por área de las cuencas Arenal y Cachí. Para ello, se procedió a trabajar con la tabla de contingencia y los resultados se muestran a continuación en gráficos de barras, en donde el color azul indica el porcentaje con que el modelo pronostica escenarios bajo lo normal, en color

anaranjado cuando pronostica valores normales y en gris cuando predice lluvias por encima de lo normal. Cada gráfico muestra tres columnas, en las cuales la primera columna corresponde a los meses en que ha llovido (según las estimaciones satelitales o los datos de las estaciones meteorológicas en Arenal o Cachí, según corresponda) bajo de lo normal, la segunda columna en la cual ha llovido de forma normal y la tercera columna en los meses en que ha llovido por arriba de lo normal.

5.3.1 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para diciembre.

Como se puede observar en la figura 10, los pronósticos correspondientes a cada uno de los meses de inicialización (setiembre, octubre y noviembre) para diciembre, muestran que cuando se han dado precipitaciones por debajo de los promedios según las estimaciones del PERSIANN, el pronóstico del CFSv2 ha pronosticado de forma correcta un escenario bajo en lluvias en un 50% de las veces. Mientras que cuando llueve por encima de lo normal según el PERSIANN, las proyecciones del CFS aciertan un 50% de las veces para los pronósticos realizados en setiembre y noviembre, mientras que para el caso de octubre el porcentaje sube a un 60%. Otra característica importante en los pronósticos del modelo, es que los escenarios contrarios a los que realmente ocurren, son los que menos probabilidad de ocurrencia tienen, con valores entre 10% y 20%.

5.3.2 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para enero.

Muy similar al caso anterior de los pronósticos de diciembre, se muestra en la figura 11 que los pronósticos para enero, inicializados en los primeros días de los meses de setiembre, octubre y noviembre, tienen probabilidades de 50%, 40% y 60% (respectivamente) de acierto de pronóstico en los escenarios bajos en lluvias, cuando el CFS pronostica menos precipitaciones, mientras que, en el caso de los escenarios altos en lluvias, los pronósticos del modelo aciertan un 50% de las veces para setiembre y un 40% para octubre y noviembre. Nuevamente, los escenarios contrarios a los pronosticados por el modelo pasan a ser los menos probables, con valores de entre 10% y 20%.

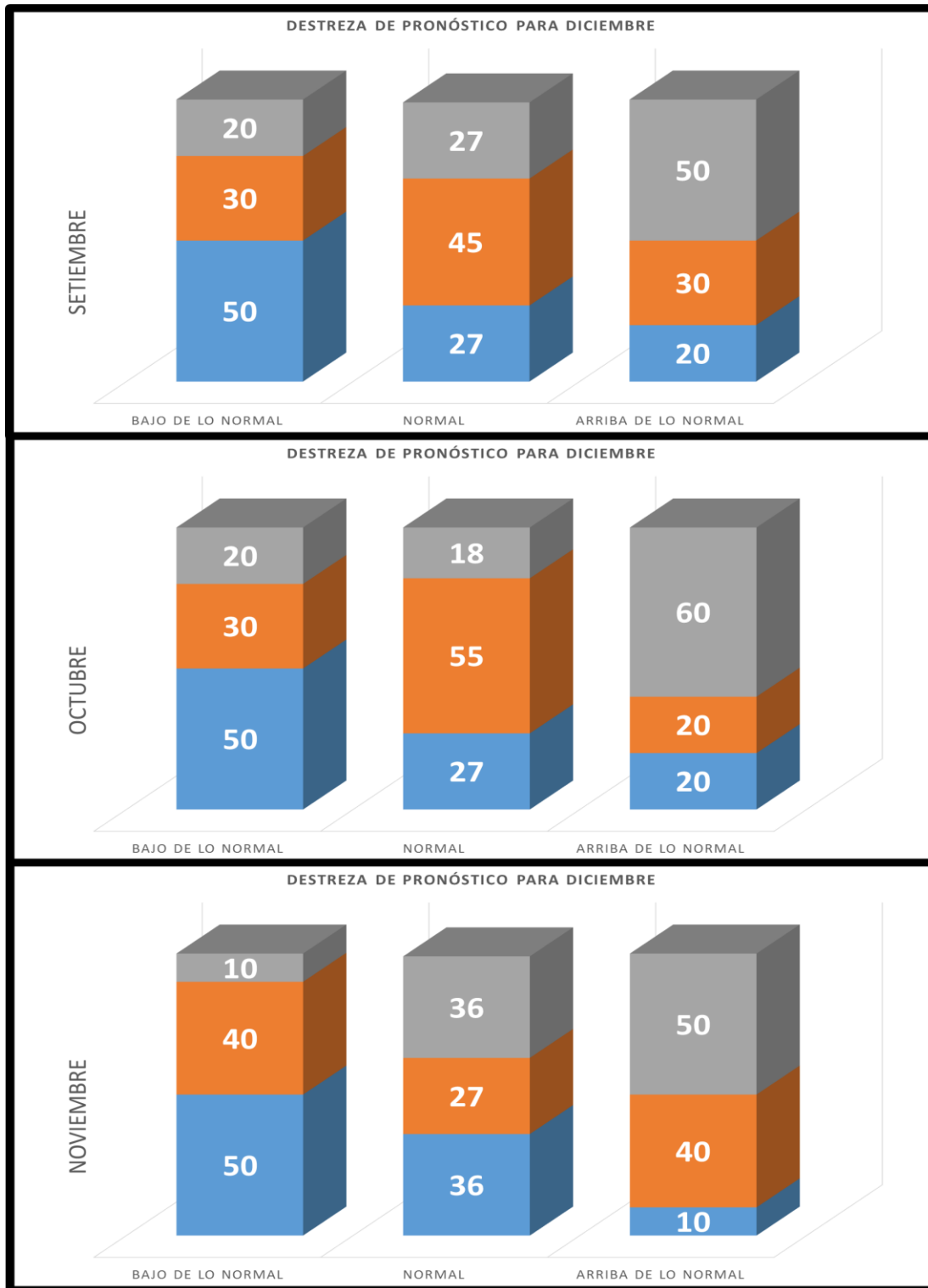


Figura 10. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para diciembre coincida en tercil con las estimaciones de precipitación del PERSIANN.

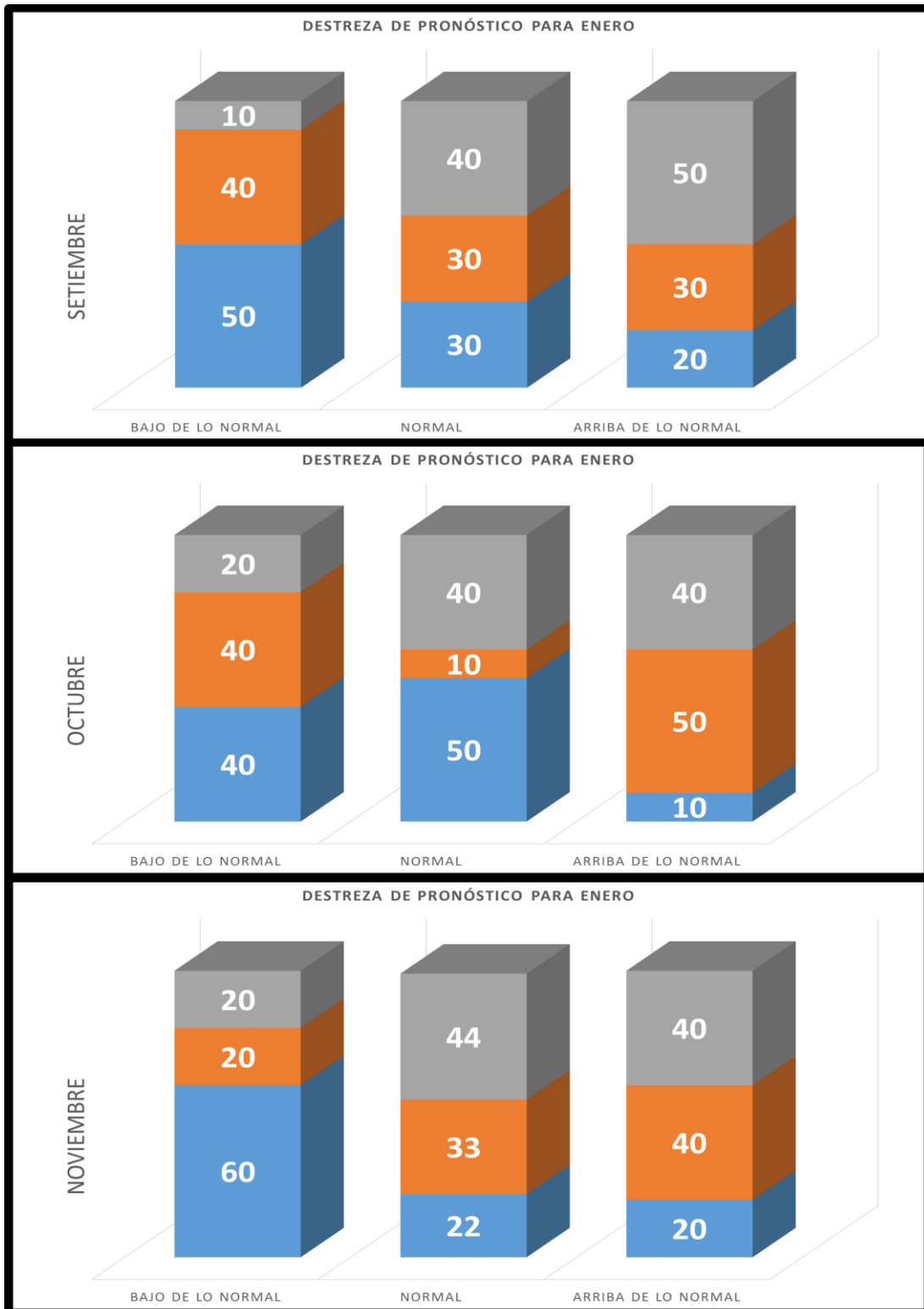


Figura 11. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para enero coincida en tercil con las estimaciones de precipitación del PERSIANN.

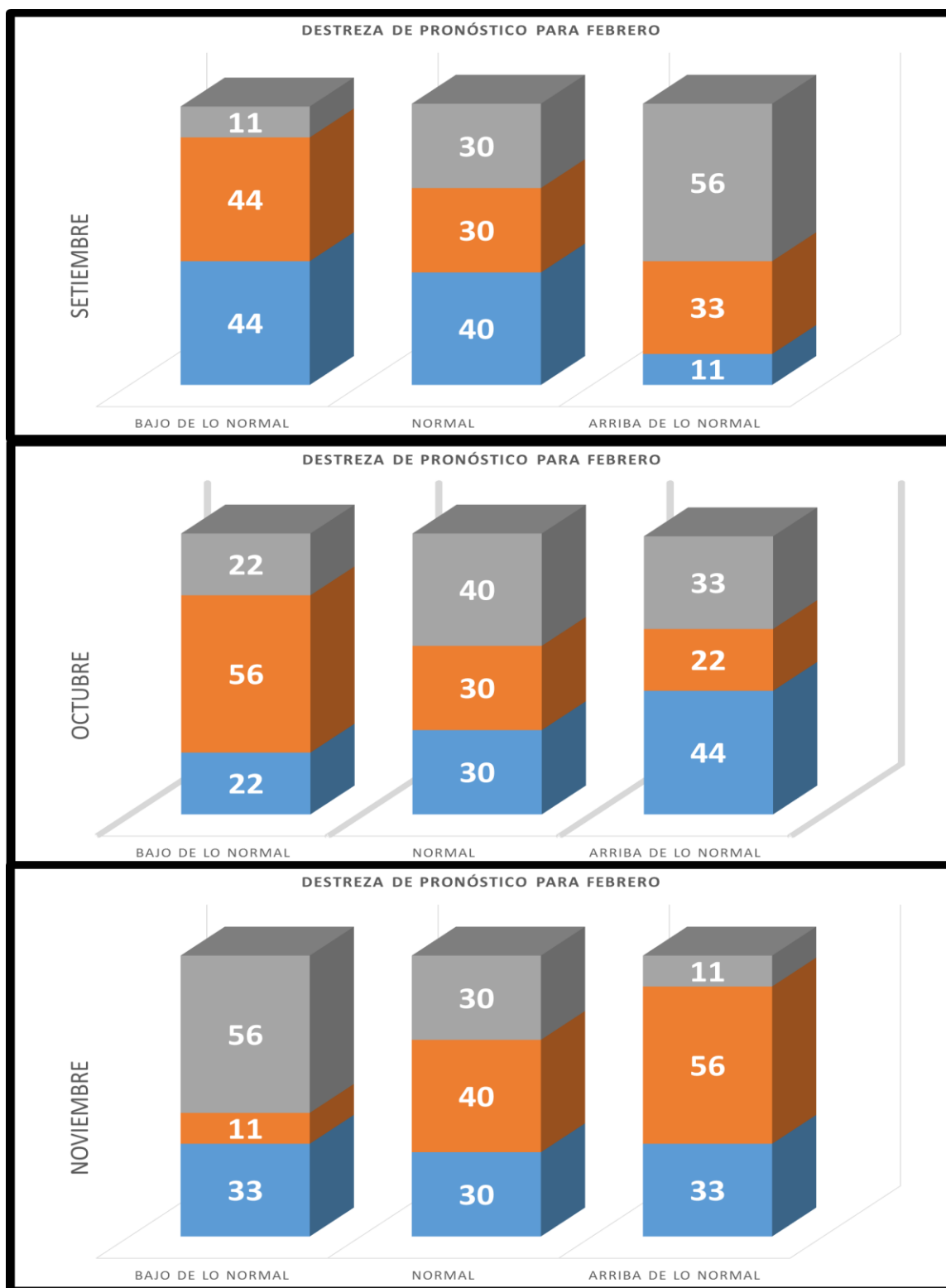


Figura 12. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para febrero coincida en tercil con las estimaciones de precipitación del PERSIANN.

5.3.3. Predicción de setiembre, octubre y noviembre para febrero.

En el caso de los pronósticos correspondientes al mes de febrero (figura 12), se muestra para el caso del pronóstico de setiembre una buena predicción del modelo, con aciertos de 44% (56%) a que se den lluvias por debajo (arriba) del promedio, con respecto a lo reportado por las estimaciones satelitales del PERSIANN. Otra vez se muestra como pronóstico menos probable, el del escenario contrario al que ocurre, con valores de apenas un 11%.

Para los pronósticos generados en el mes de octubre y noviembre el modelo no muestra destreza alguna en los pronósticos.

Posteriormente, se realizó el mismo análisis, pero con datos de precipitación media por área, a partir de estaciones meteorológicas ubicadas en las cuencas de Arenal y Cachí. Los datos se muestran a continuación.

5.3.4 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para diciembre en Arenal.

En el caso de los resultados obtenidos para la lluvia media de la cuenca de Arenal (figura 13), se puede observar que, en el pronóstico del modelo del mes de setiembre, no tiene ninguna capacidad prediciendo si las precipitaciones serán menores o mayores en el mes de diciembre. Lo único destacable es que cuando el modelo pronostica un escenario bajo en las precipitaciones, las probabilidades de que se dé el escenario contrario, son de apenas un 9%. En el caso del mes de octubre, el pronóstico mejora considerablemente, y los pronósticos aumentan a un 45% (64%) de probabilidades de que el modelo estime precipitaciones bajo (arriba) lo normal cuando en realidad llueve menos (más) que el promedio. Finalmente, en el caso del pronóstico de noviembre, los pronósticos del CFS mejoran aún más y se observa que el modelo acierta en un 55% de las veces que se generan precipitaciones por debajo o por encima de lo normal para la cuenca de Arenal en el mes de diciembre, siendo los escenarios contrarios a los predichos por el modelo como los menos probables.

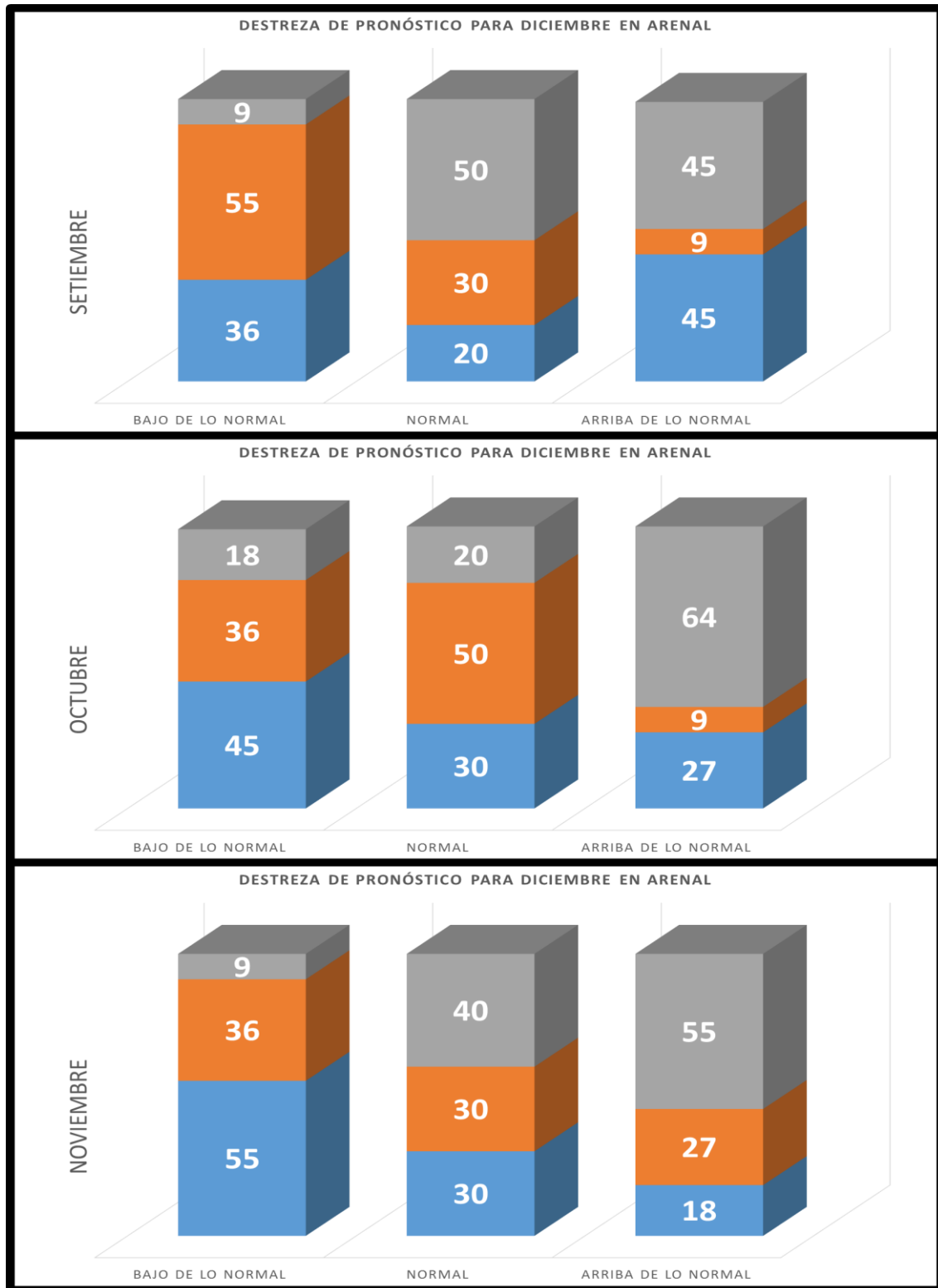


Figura 13. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para diciembre coincida en tercil con la lluvia media por área de Arenal.

5.3.5 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para enero en Arenal.

En el caso de los pronósticos para enero (figura 14), se aprecia que los pronósticos generados en el mes de setiembre, no tienen destreza para predecir si las precipitaciones serán menores o mayores, ya que más bien hay una tendencia en el modelo a indicar lo contrario a lo que realmente ocurre para la cuenca Arenal. En el caso del mes de octubre, el pronóstico mejora considerablemente, y las probabilidades de acierto de un escenario bajo (arriba) de lo normal aumentan a un 55% (45%). Algo notable de la predicción de los escenarios arriba de lo normal es que solo en un 9% de los casos el modelo ha pronosticado lluvias por encima de lo normal y se ha dado el escenario contrario. En el caso del pronóstico de noviembre, éste es menos acertado, ya que si bien en un 50% de las veces que ha pronosticado lluvias por debajo de lo normal ha acertado, esta relación no se ve en los escenarios arriba de lo normal. El único aspecto positivo en este escenario, es que solo en un 10% de las veces el modelo ha pronosticado que va a llover menos y ocurre lo opuesto.

5.3.6 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para febrero en Arenal.

Finalmente, para el caso de las precipitaciones de Arenal en febrero, los resultados de setiembre en la figura 15 apenas muestran un poco de destreza, con porcentajes del 36% para los escenarios arriba o bajo lo normal y un 27% de probabilidades de que se den los escenarios opuestos. En el caso del mes de octubre, el pronóstico mejora parcialmente, ya que las probabilidades de que el modelo estime precipitaciones bajo lo normal cuando en realidad llueve menos que el promedio, aumentan a un 45%; sin embargo, para los casos de estimación de precipitación por arriba de lo normal, la señal más bien es contraria, lo que indica que el modelo en más de la mitad de las veces cuando pronostica lluvias por encima de lo normal, realmente caen menos. En el caso del pronóstico de noviembre, éste es menos acertado, y realmente no cuenta con capacidad alguna para pronosticar.

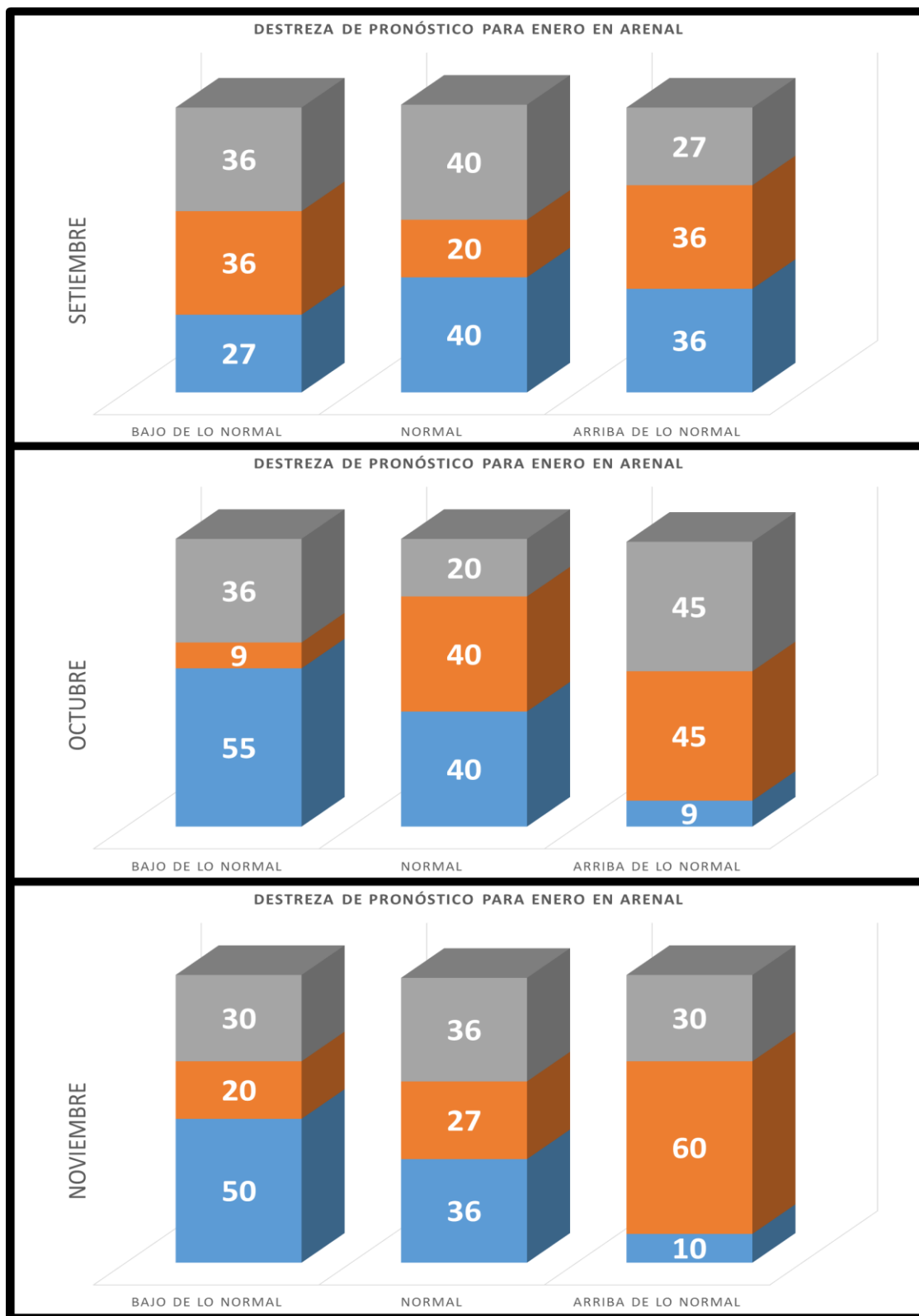


Figura 14. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para enero coincida en tercil con la lluvia media por área de Arenal.

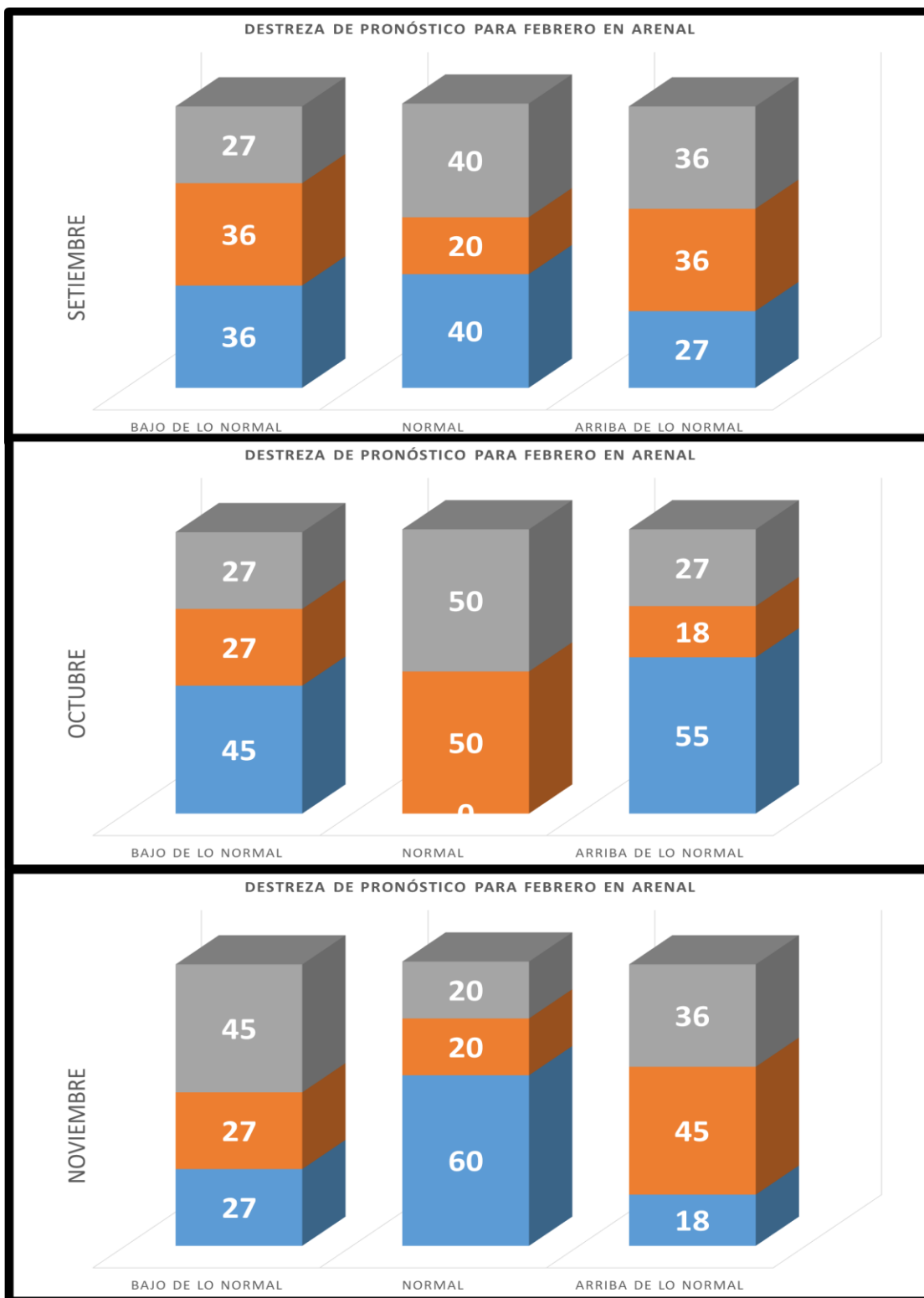


Figura 15. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para febrero coincida en tercil con la lluvia media por área de Arenal.

5.3.7 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para diciembre en Cachí.

En el caso de los resultados obtenidos para la lluvia media de diciembre sobre la cuenca Cachí (figura 16), se aprecia que el pronóstico del modelo del mes de setiembre, no tiene capacidad de predecir si las precipitaciones serán menores o mayores. Al igual que en el caso de Arenal, en octubre los pronósticos aumentan a un 45% (64%) las probabilidades de acierto de un escenario bajo (arriba) de lo normal cuando en realidad llueve menos (más) que el promedio. En este caso el pronóstico es más robusto que para la cuenca del Arenal, ya que las veces en que el modelo ha pronosticado menos (más) lluvias y se ha dado el escenario contrario, es apenas del 9% (18%). El pronóstico de noviembre para diciembre, al igual que en Arenal, mejora aún más y se observa que el modelo acierta en un 55% de las veces que se generan precipitaciones por debajo o por encima de lo normal para la cuenca de Cachí, mientras que, las probabilidades de que ocurra el escenario contrario al pronosticado es del 18% y 9%, respectivamente, siendo el menos probable.

5.3.8 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para enero en Cachí.

Con respecto a las probabilidades de acierto para el mes de enero en Cachí (figura 17), las predicciones del mes de setiembre indican que el CFSv2 no tiene capacidad de representar precipitaciones menores o mayores. En el caso del mes de octubre, el pronóstico mejora y los escenarios aumentan a un 45% de probabilidades de que se estimen precipitaciones bajo (arriba) lo normal cuando en realidad llueve menos (más) que el promedio. Al igual que con Arenal, la relación es aún mejor para los escenarios arriba de lo normal, para los cuales solo en 9% de los casos el modelo ha pronosticado lluvias por encima de lo normal y se ha dado el escenario contrario. En el caso del pronóstico de noviembre, éste es más acertado que en el caso de Arenal, ya que indica que en un 50% (40%) de las veces que ha pronosticado lluvias por debajo (encima) de lo normal ha acertado, y que solo en un 20% (10%) de las veces el modelo ha pronosticado que va a llover menos (más) y ha llovido más (menos).

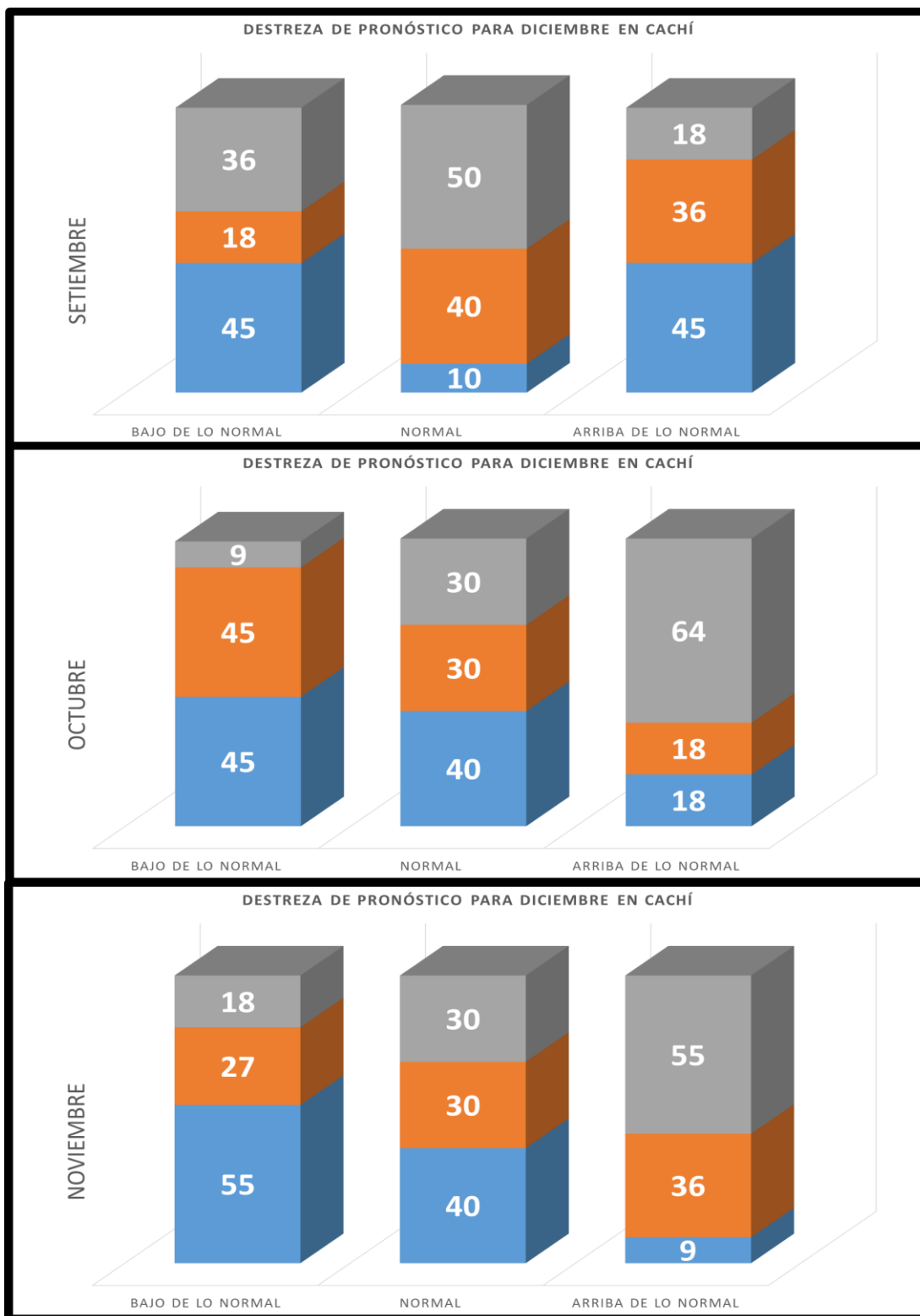


Figura 16. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para diciembre coincida en tercil con la lluvia media por área de Cachí.

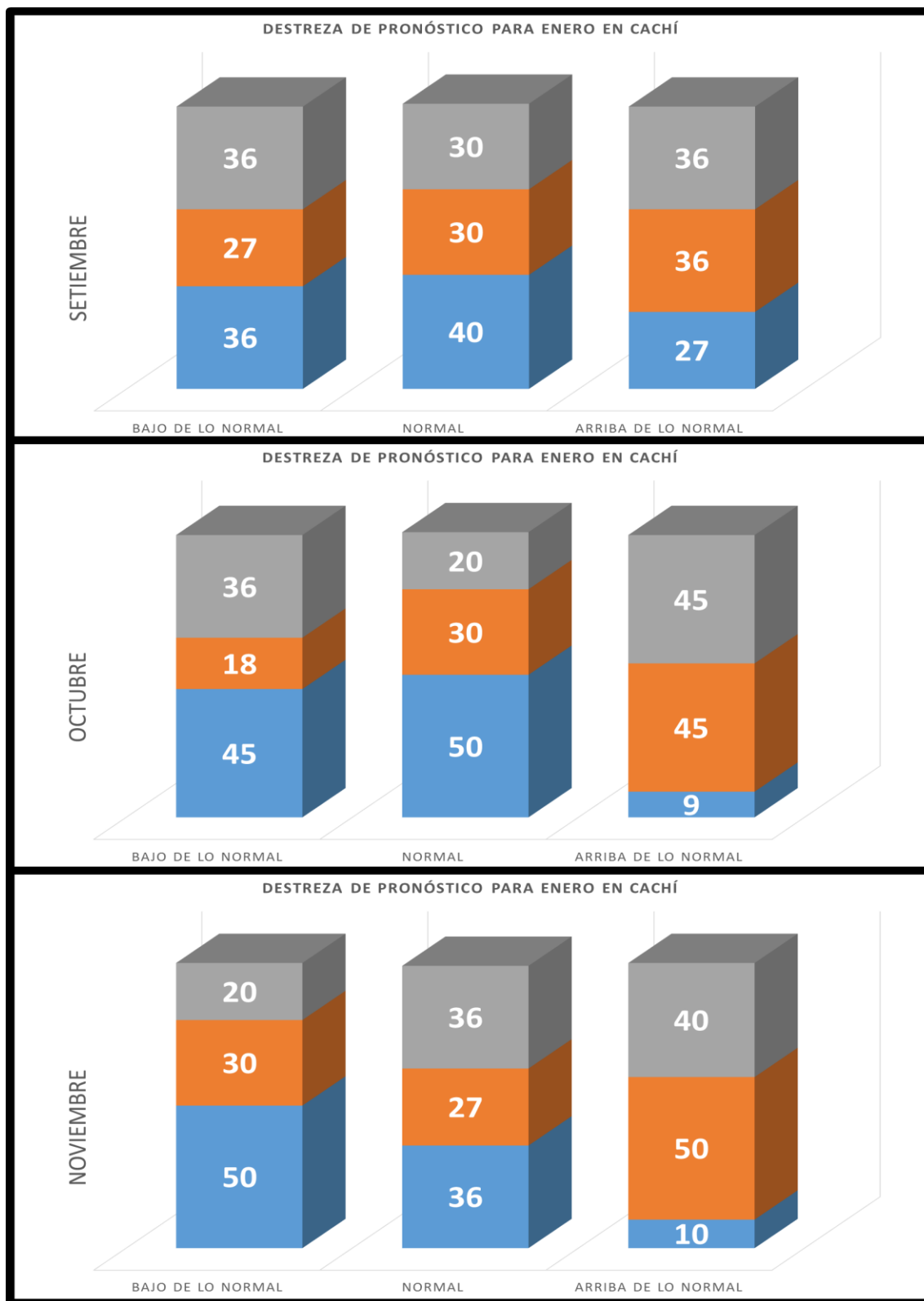


Figura 17. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para enero coincida en tercil con la lluvia media por área de Cachí.

5.3.9 Predicción de setiembre, octubre y noviembre para febrero en Cachí.

En cuanto al comportamiento de las lluvias en febrero (figura 18), se puede notar que los pronósticos del mes de setiembre para Cachí tienen resultados similares a los de Arenal, en donde apenas hay destreza en predecir si las precipitaciones serán menores o mayores, ya que es muy poca la diferencia entre los porcentajes de los distintos escenarios. Del pronóstico elaborado en octubre, a diferencia de lo ocurrido con la cuenca Arenal, no es mejor, debido a que el modelo no muestra capacidad alguna para pronosticar escenarios arriba ni bajo lo normal. La predicción de noviembre, al igual que con Arenal, es menos acertada, y realmente no se cuenta con destreza alguna para pronosticar.

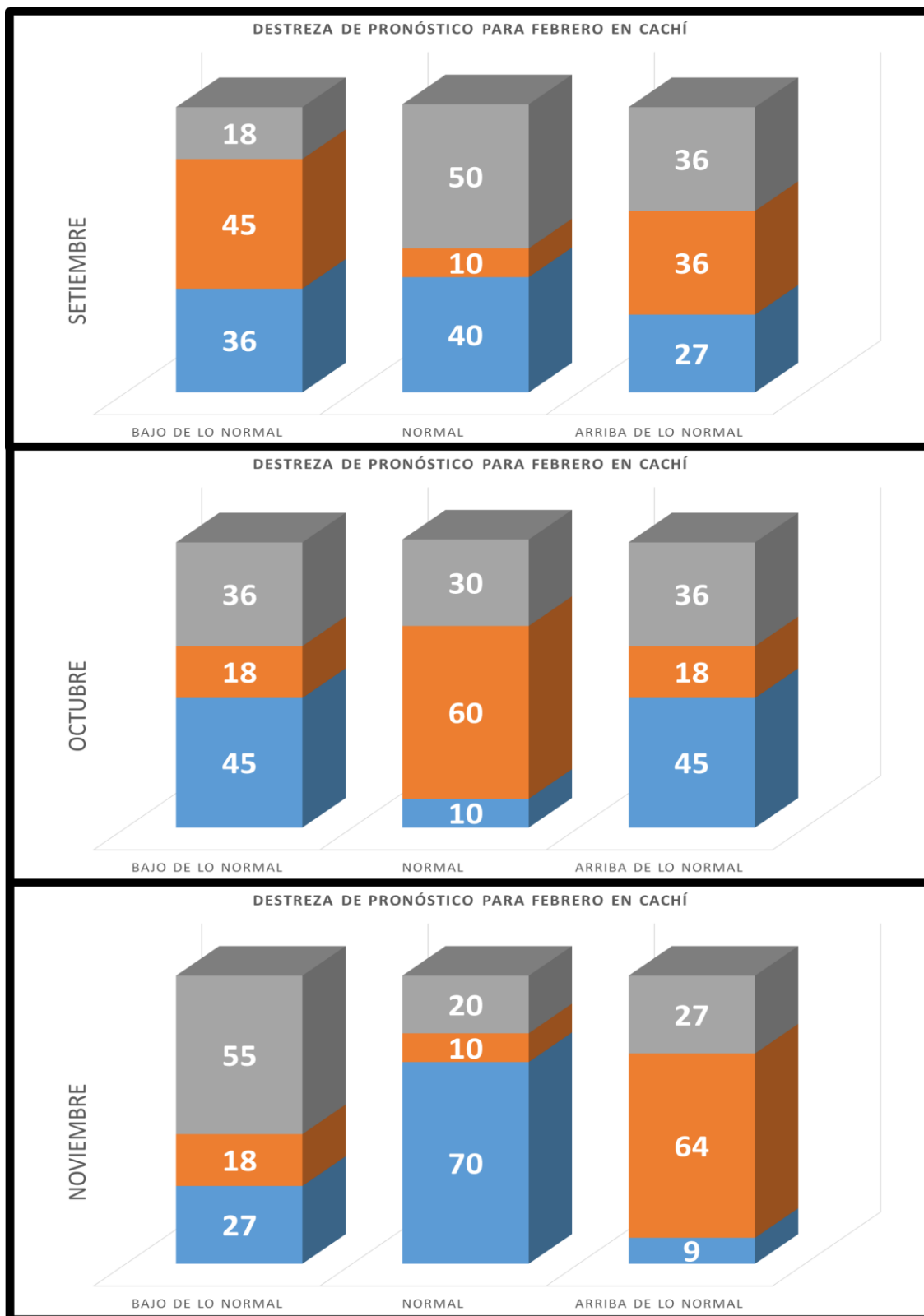


Figura 18. Gráfico de barras con los porcentajes de probabilidad de que el pronóstico del modelo CFSv2 para febrero coincida en tercil con la lluvia media por área de Cachí.

6. Discusión

En resumen, el producto GPCP con escala espacial de un grado a nivel diario, no muestra de forma correcta en base a su climatología disponible (1996 - 2018), las precipitaciones sobre el país para los meses de diciembre, enero y febrero.

Por otro lado, las estimaciones de satélite del producto PERSIANN (1984 – 2018), identifican mejor las zonas del país donde más llueve para los meses de estudio; sin embargo, sí se aprecia una importante subestimación en la cantidad de precipitación.

El modelo CFS presenta un importante sesgo húmedo en las precipitaciones generadas en la costa del país. El mismo no fue posible determinarlo cuantitativamente debido a que los datos de satélite utilizados estiman menos precipitación que lo observado en el Caribe, según la comparación con información proveniente de estaciones meteorológicas.

De igual forma, el modelo CFSv2 no modela correctamente en intensidad la componente zonal del viento en la región del máximo de la corriente en chorro de bajo nivel en el Caribe durante la época invernal, debido a que la subestima. A pesar de esto, muestra el comportamiento indicado por Amador (2003) en relación con su variabilidad climática. Específicamente, el modelo muestra magnitudes más altas (bajas) del jet, en los años La Niña (El Niño).

Las tablas de contingencia generadas para comparar el CFS con las estimaciones satelitales del PERSIANN, muestran que el modelo tiene una buena destreza para pronosticar desde setiembre, octubre y noviembre, el comportamiento (bajo o arriba de lo normal) de las precipitaciones en diciembre y enero sobre el Caribe de Costa Rica. Para el caso de la precipitación de febrero, interesantemente, el único pronóstico que muestra una buena representación corresponde al del mes de setiembre, mientras que los pronósticos de octubre y noviembre no se identifica alguna capacidad de predicción en el modelo.

Posteriormente, al hacer el análisis con las lluvias medias por área en las cuencas de Arenal y Cachí, los pronósticos del mes de setiembre para diciembre sobre ambas

regiones no muestran una marcada capacidad, mientras que para el mes de octubre y noviembre el modelo sí presenta una destreza de predecir los escenarios altos o bajos en lluvia para dicho mes. Para el caso del mes de enero, los pronósticos de setiembre no muestran pericia alguna, al igual que en el caso de los pronósticos para el mes de diciembre. Sin embargo, es evidente una mejora cuando se usan los pronósticos inicializados en el mes de octubre para ambas cuencas. En el caso de los pronósticos del mes de noviembre para enero, se nota que el modelo genera un buen pronóstico para la cuenca Cachí, no así en la cuenca Arenal. Como último punto, los pronósticos de setiembre para el mes de febrero muestran apenas una cierta destreza, pero no con porcentajes altos, ya que es muy poca la diferencia entre los porcentajes de los distintos escenarios. Para octubre el pronóstico mejora parcialmente para Arenal, cuando el modelo estima precipitaciones por debajo de lo normal, no así para cuando las precipitaciones son por encima de lo normal. En el caso de Cachí no hay mejora en el pronóstico. En último lugar en las predicciones del mes de noviembre a febrero, no existe destreza en ninguna de las cuencas de estudio.

El hecho que el modelo genere precipitaciones tan elevadas sobre el país parece estar relacionado al esquema de convección de cúmulos, ya que inicialmente se pensó que dichas sobreestimaciones estaban asociadas a que el modelo eventualmente generaba una corriente en chorro de bajo nivel en el Caribe más intensa, lo cual permitiría un mayor transporte de humedad desde el océano hacia el continente; sin embargo, en este estudio se observa que realmente ocurre todo lo contrario.

7. Aplicación de la Investigación

A partir de los resultados obtenidos en el proceso de validación del modelo CFSv2, se nota que el modelo CFSv2 presenta, de forma recurrente, un alto sesgo húmedo en los valores de precipitación sobre la vertiente Caribe de Costa Rica. No obstante, en el pronóstico estacional interno, usando la salida del CFSv2 correspondiente al 5 de setiembre del 2018 se observó que el modelo pronosticaba escenarios de lluvias bastante bajos para el mes de febrero (valores incluso menores al percentil 10, del histórico de pronósticos de 1984 al 2017), por lo que se inició un proceso interno de información para comunicarle al Negocio de Generación de Energía, así como al Centro de Control de Energía Nacional (CENCE), ambos del ICE, sobre la necesidad de iniciar los preparativos ante una posible época invernal menos lluviosa. Conforme transcurrieron las semanas, se mantuvo la proyección de muy pocas lluvias e incluso se fue ampliando para los meses de diciembre y enero.

Posteriormente, cuando se vuelve a realizar la actualización del pronóstico estacional a nivel interno, se usan los datos de la salida del modelo correspondiente al 5 de octubre, en donde se observa que el escenario de precipitaciones por debajo del promedio, no solo incluye diciembre y enero, sino que además genera pronósticos con valores inferiores a los correspondientes al percentil 10, por lo que a través del Director del Centro de Servicios, se solicita un espacio con la Gerencia para presentar los escenarios de precipitaciones ante los directores del Negocio de Electricidad y así alertarlos sobre los escenarios secos que se veían como el escenario más probable, sin descartar escenarios extremadamente secos. Dicha reunión se llevó a cabo el día 16 de octubre del 2018 y se expuso lo ya mencionado para que fuera insumo de ellos como tomadores de decisiones.

Tabla 4. Valores pronosticados por el modelo CFSv2 en los meses de setiembre, octubre y noviembre 2018, para diciembre 2018, enero y febrero 2019.

CFSv2 setiembre			CFSv2 octubre			CFSv2 noviembre		
diciembre	enero	febrero	diciembre	enero	febrero	diciembre	enero	febrero
259.6	138.4	23.2	100.4	45.7	63.3	166.1	40.6	5.6

Consecutivamente, para la actualización del pronóstico estacional del mes siguiente, se utiliza la salida del modelo correspondiente al 5 de noviembre del 2018, en donde se mantienen los pronósticos de precipitaciones por debajo de los promedios para los tres meses de estudio, sin embargo, para el mes de diciembre el déficit pronosticado es menor al pronosticado en octubre, mientras que para los meses de enero y febrero se proyectaban condiciones aún más secas que las que mostraba las salidas del CFSv2, del mes anterior, manteniéndose en valores considerablemente más bajos que el percentil 10. Lo anterior hizo que se mantuviera a nivel interno los avisos relacionados con una época invernal con lluvias deficitarias y posiblemente extremas.

Los valores pronosticados por el modelo CFSv2, para los distintos meses se observan en la tabla 4, mientras que los valores de los percentiles 33 y 10, a nivel histórico, se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Valores pronosticados por el modelo CFSv2 en los meses de setiembre, octubre y noviembre 2018, para diciembre 2018, enero y febrero 2019.

	CFSv2 setiembre			CFSv2 octubre			CFSv2 noviembre		
	diciembre	enero	febrero	diciembre	enero	febrero	diciembre	enero	febrero
Percentil 33	212.4	105.1	43.3	190.0	112.5	48.2	200.7	80.9	44.2
Percentil 10	154.6	75.6	29.2	154.9	70.9	29.1	147.7	53.4	26.9

Finalmente, lo que ocurrió cumplido el período, fue que se dió el diciembre más seco de todo el registro (que inició en 1977) en Arenal (-76%) y el segundo más seco desde 1974 para Cachí (-70%), así como el segundo mes de enero más seco del registro para Arenal (-79%) y el tercero más seco del registro para Cachí (-66%). En febrero los déficits fueron importantes, pero no históricos, con porcentajes de -45% y -48% para Arenal y Cachí respectivamente.

8. Conclusiones

Se generaron las climatologías de precipitación y viento en bajo nivel con las predicciones del modelo CFS entre el año 1984 y 2017, para la época invernal del Hemisferio Norte (diciembre, enero y febrero), en donde se identificó que el modelo cuenta con un sesgo húmedo en sus predicciones, el cual a pesar de esto, puede generar escenarios arriba o bajo los normales, que coinciden con las estimaciones satelitales y los datos medidos por estaciones meteorológicas.

En el caso del viento en bajo nivel, a la hora de validar las magnitudes que genera el modelo, se logró identificar que en términos generales tiende a subestimar la intensidad del Chorro de bajo nivel del Caribe sin embargo, es capaz de identificar que la intensidad de dicha característica en el Mar Caribe, es más fuerte (débil) en los años Niña (Niño).

Se concluye que el modelo CFS puede generar escenarios confiables a partir del mes de octubre, para los meses de diciembre y enero en las cuencas de Arenal y Cachí; siendo la excepción el mes de febrero, en el cual, ninguno de los meses de pronóstico mostró una destreza rescatable en la proyección de escenarios. Incluso no se descarta que sea una herramienta con una destreza suficiente para pronosticar eventos extremos secos.

9. Recomendaciones

- Realizar un estudio más profundo para cuantificar los posibles excesos de precipitación del modelo CFSv2 (bias correction).
- Usar el modelo CFS en un modelo de mesoescala para ver si se puede corregir el exceso de precipitación con otro esquema de convección de cúmulos o mejorando con la escala, la representación de las características climáticas a una escala regional y local.

10. Referencias

Amador, JA. (1998). A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos Oceanográficos* 5(2):1–13.

Amador, JA. & Magaña, V. (1999). Dynamics of the low level jet over the Caribbean Sea. Preprints, the 23rd conference on hurricanes and tropical meteorology, American Meteorological Society Dallas, pp 868–869.

Amador, J.A. R. Chacón and S. Laporte, 2003. Climate and climate variability in the Arenal River Basin of Costa Rica. In *Climate, Water and Trans-boundary Challenges in the Americas*. Ed. Henry Días and Barbara Morehouse. Kluwer Academic Publishers. Holland, pp. 317 – 349.

Amador, J. A. (2008). The Intra-Americas Seas Low-Level Jet (IALLJ): Overview and Future Research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 153-188. doi: 10.1196/annals.1446.012.

Arkin, P. A., and B. N. Meisner, 1987: Spatial and annual variation in the diurnal cycle of large-scale tropical convective cloudiness and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1009–1032. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<2009:SA AV IT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<2009:SA AV IT>2.0.CO;2).

Ashouri, H., K.L.Hsu, S.Sorooshian, D.K.Braithwaite, K.R.Knapp, L.D.Cecil, B.R.Nelson, and O.P.Pratt, 2015: PERSIANN CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 69–83. doi:10.1175/BAMS-D-13-00068.1.

CDO 2018: Climate Data Operators. Disponible en: <http://www.mpimet.mpg.de/cdo>

Fallas-López, B. y Alfaro, E. (2012a). Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a

los Foros Climáticos Regionales 1: Análisis de tablas de contingencia. *Revista de Climatología*, 12, 61-79.

Fallas-López, B. y Alfaro, E. (2012b). Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales 2: Análisis de correlación canónica. *Revista de Climatología*, 12, 93-105.

Hsu, K., X. Gao, S. Sorooshian, and H. Gupta, 1997: Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *J. Appl. Meteor.*, 36, 1176–1190. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<1176:PEFRSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1176:PEFRSI>2.0.CO;2)

Hsu, K. H. V. Gupta, X. Gao, and S. Sorooshian, 1999: Estimation of physical variables from multichannel remotely sensed imagery using a neural network: Application to rainfall estimation. *Water Resour. Res.*, 35, 1605–1618. doi: 10.1029/1999WR900032

Huffman, G., Adler, R., Bolvin, D., Gu, G., Nelkin, E., Bowman, K., Hong, Y., Stocker, E., and Wolff, D.: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TCMA): quasi-global, multiyear, combined- sensor precipitation estimates at fine scales, *J. Hydrometeorol.*, 8, 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2009: Atlas Climatológico de Costa Rica.

Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin, and P. Xie, 2004: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeorol.*, 5, 487–503. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2)

Knapp, K. R., 2008a: Scientific data stewardship of International Satellite Cloud Climatology Project B1 global geostationary observations. *J. Appl. Remote Sens.*, 2, 023548. doi: 10.1117/1.3043461

Knapp, K.R., 2008b: Calibration assessment of ISCCP geostationary infrared observations using HIRS. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 183–195. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA910.1>

Knapp, K.R.; Ansari, S.; Bain, L.; Bourassa, M.A.; Dickinson, M.J.; Funk, C.; Helms, C.N.; Hennon, C.C.; Holmes, C.; Huffman, G.J.; et al. Globally gridded satellite observations for climate studies. *Bull. Am. Met. Soc.* 2011, 92, 893–907. <https://doi.org/10.5194/essd-2018-33>

Rodríguez A. 1970. Avenida Máxima, Río Macho. Instituto Costarricense de Electricidad. Oficina de Estudios Básicos. Sección de Hidrología.

Saha, S., S. Nadiga, C. Thiaw, J. Wang, W. Wang, Q. Zhang, H.M. Van Den Dool, H.-L. Pan, S. Moorthi, D. Behringer, D. Stokes, M. Pena, S. Lord, G. White, W. Ebisuzaki, P. Peng, and P. Xie, 2006: The NCEP Climate Forecast System. *J. Climate* 19 (15): 3483–3517. doi:10.1175/JCLI3812.1

Saha S, Moorthi S, Pan H- L, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler R, Woollen J, Behringer D, Liu H, Stokes D, Grumbine R, Gayno G, Hou Y- T, Chuang H- Y, Juang H- MH, Sela J, Iredell M, Treadon R, Kleist D, van Delst P, Keyser D, Derber J, Ek M, Meng J, Wei H, Yang R, Lord S, van den Dool H, Kumar A, Wang W, Long C, Chelliah M, Xue Y, Huang B, Schemm J- K, Ebisuzaki W, Lin R, Xie P, Chen M, Zhou S, Higgins W, Zou C- Z, Liu Q, Chen Y, Han Y, Cucurull L, Reynolds RW, Rutledge G, Goldberg M. 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 91: 1015–1057.

Saha S, Moorthi S, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Pan H-L, Behringer D, Hou Y-T, Chuang H-y, Iredell M, Ek M, Meng J, Yang R, van den Dool H, Zhang Q, Wang W, Chen M. 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate* 27: 2185–2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1

Sorooshian, S., K.-L. Hsu, X. Gao, H. V. Gupta, B. Imam, and D. Braithwaite, 2000: Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2035–2046. doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSSE>2.3.CO;2.

Turk, J. T., G. V. Mostovoy, and V. Anantharaj, 2010: The NRL-Blend high resolution precipitation product and its application to land surface hydrology. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, M. Gebremichael and F. Hossain, Eds., Springer, 85–104. doi: 10.1007/978-90-481-2915-7_6.

Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low level jet and its relations to climate. *Climate Dynamics*. 29: 411–422. doi: 10.1007/s00382-007-0243-z.

WCRP, 1986: Report of the workshop on global large scale precipitation data sets for the World Climate Research Programme. WCP-111, WMO/TD-No. 94, 45 pp.

Zárate, E. (2013). Climatología de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe y su relación con algunos Índices Árticos. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 12, 35-55 p.

11. Anexo

11.1 Setiembre para el mes de diciembre.

Se identificaron los años 1996, 1999 y 2014 como los que presentaban menores diferencias entre lo pronosticado por el modelo y lo calculado vía satélite, en estos años las diferencias no superaron los 50 mm, mientras que los años 1986, 1990, 2003, 2004, 2006, 2008, 2009, 2011 y 2013, presentaron diferencias que no superaron los 100 mm, el promedio de las diferencias de los años mencionados se muestra en la figura A-1.

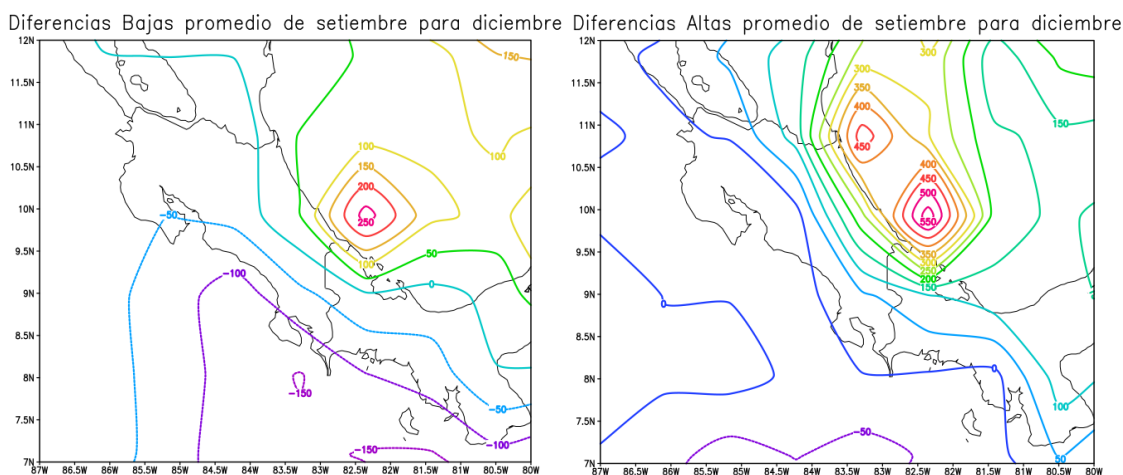


Figura A-1. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de setiembre del CFSv2 para el mes de diciembre y la estimación satelital de PERSIANN.

En el caso de las diferencias altas, se identificaron las presentes en el año 1991 con 250 mm, así como los años 1988 y 1995 con más de 300 mm de diferencia, el promedio de dichas diferencias se muestra en la figura A-1.

11.2 Octubre para el mes de diciembre.

En el caso de las predicciones del mes de octubre para el mes de diciembre, se notaron 3 años con resultados bastante similares a los obtenidos con imágenes satelitales, en los cuales las diferencias no superaron los 50 mm, dichos años fueron los años 1987, 2006 y 2012. Además, se observaron otros años con diferencias que no superaron los 100 mm, los cuales fueron los años 1985, 1986, 1996, 1997, 2004 y 2015 (promedio de las

diferencias entre el pronóstico del modelo y la estimación satelital se muestra en la figura A-2).

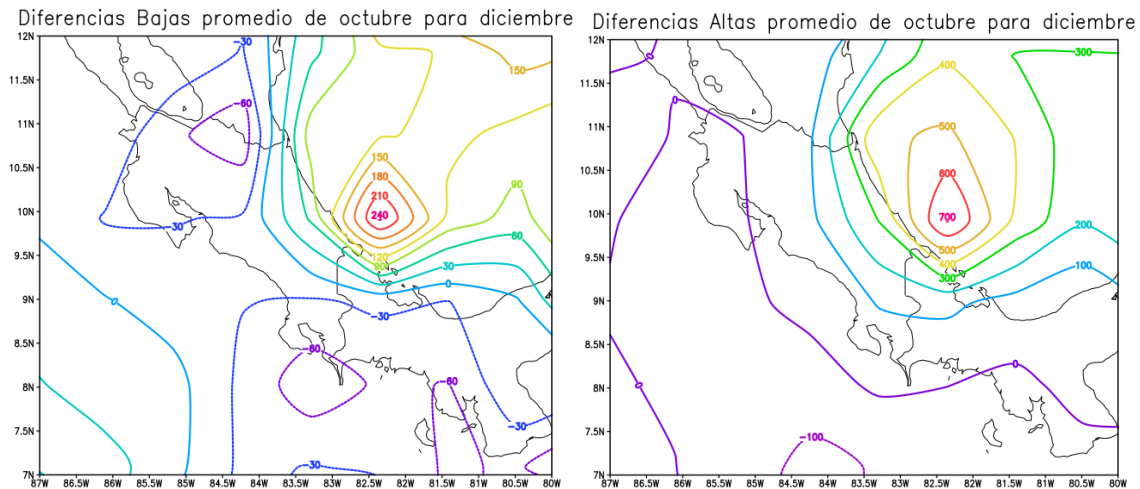


Figura A-2. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de octubre del CFSv2 para el mes de diciembre y la estimación satelital de PERSIANN.

Por otro lado, los años 2000 y 2003 presentaron diferencias mayores a los 300 mm, pero el año que más diferencia presentó fue el año 2013 con valores cercanos a los 500 mm, el promedio de las diferencias de dichos años se muestra en la figura A-2.

11.3 Noviembre para el mes de diciembre.

En las proyecciones del modelo correspondientes al mes de noviembre se notó que solo en el año 1987 las diferencias entre el modelo y la estimación satelital superaron los 50 mm, mientras que los años 1996, 2001, 2003, 2004, 2015, presentaron valores que no superaron los 100 mm; el promedio de dichas diferencias se muestra en la figura A-3.

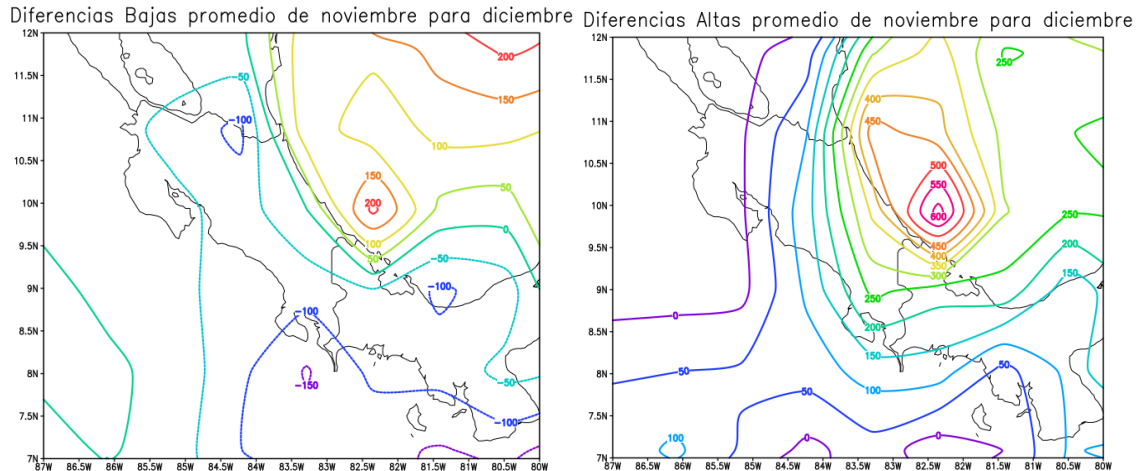


Figura A-3. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de noviembre del CFSv2 para el mes de diciembre y la estimación satelital de PERSIANN.

En los años 2011, 2013 y 2016, las diferencias alcanzan los 400 mm, y el más alto, el año 2014, con valores que superan los 500 mm, el promedio de dichas diferencias se muestra en la figura A-3.

11.4 Setiembre para el mes de enero.

En el caso de las proyecciones del mes de setiembre para enero, se encontraron diferencias con valores que no superan los 50 mm, en los años 2014 y 2015, mientras que los años 1988, 2001, 2006, 2012, 2017, presentaron diferencias inferiores a los 100 mm, el promedio de dichas diferencias se muestra en la figura A-4.

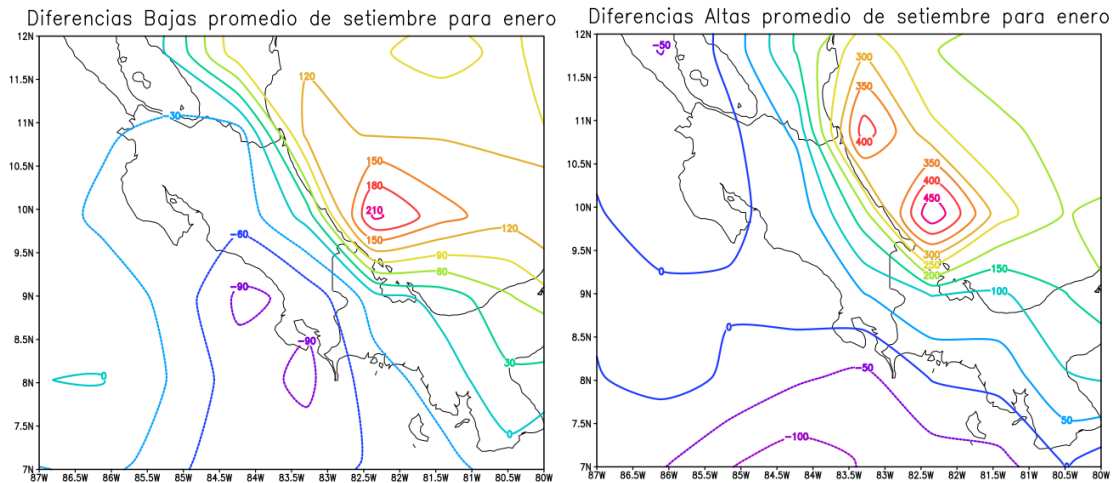


Figura A-4. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de setiembre del CFSv2 para el mes de enero y la estimación satelital de PERSIANN.

Por el lado contrario se situó el año 1999 con valores que superaron los 200 mm, y los años 1989, 2013, con valores que superan los 250 mm, el promedio de dicha diferencia se muestra en la figura A-4.

11.5 Octubre para el mes de enero.

Analizando las proyecciones del modelo en octubre para el mes de enero, se observa que los años 1988, 1990, 1995, 2001, 2002 y 2015, presentan diferencias que no superaron los 50 mm, mientras que los años 2006 y 2014 tuvieron diferencias que no fueron superiores a los 100 mm, los promedios de dichas diferencias se muestran en la figura A-5.

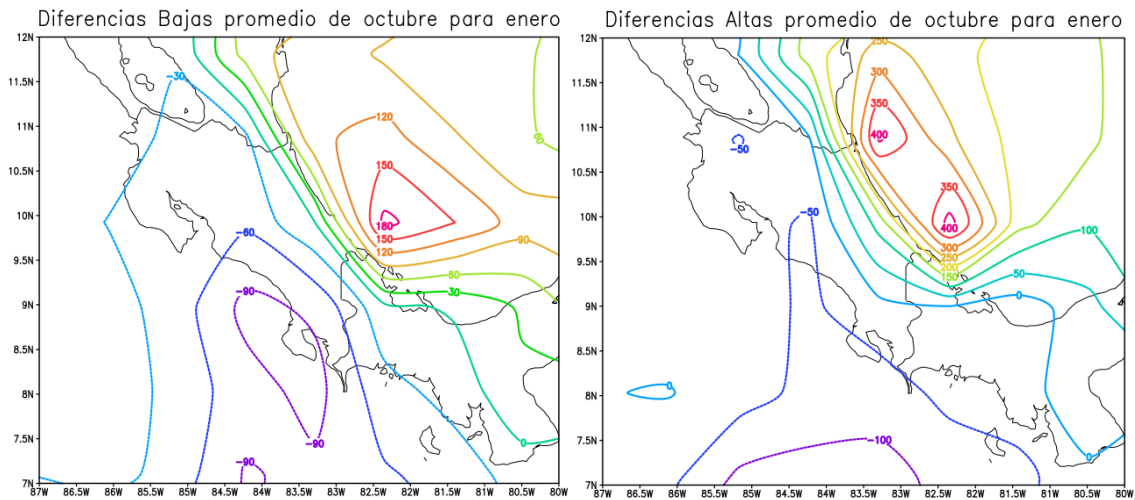


Figura A-5. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de octubre del CFSv2 para el mes de enero y la estimación satelital de PERSIANN.

Al contrario, los años 1989, 1996, 2017 se observaron valores superiores a los 200 mm (promedio de las diferencias se muestra en la figura A-5).

11.6 Noviembre para el mes de enero.

En la proyección del modelo en noviembre para enero, se obtuvieron los años 1995, 2001 y 2007 con diferencias menores a los 50 mm, mientras que los años 1994, 2006, 2009 y 2015 presentaron diferencias que no superaron los 100 mm, el promedio de dichas diferencias se muestra en la figura A-6.

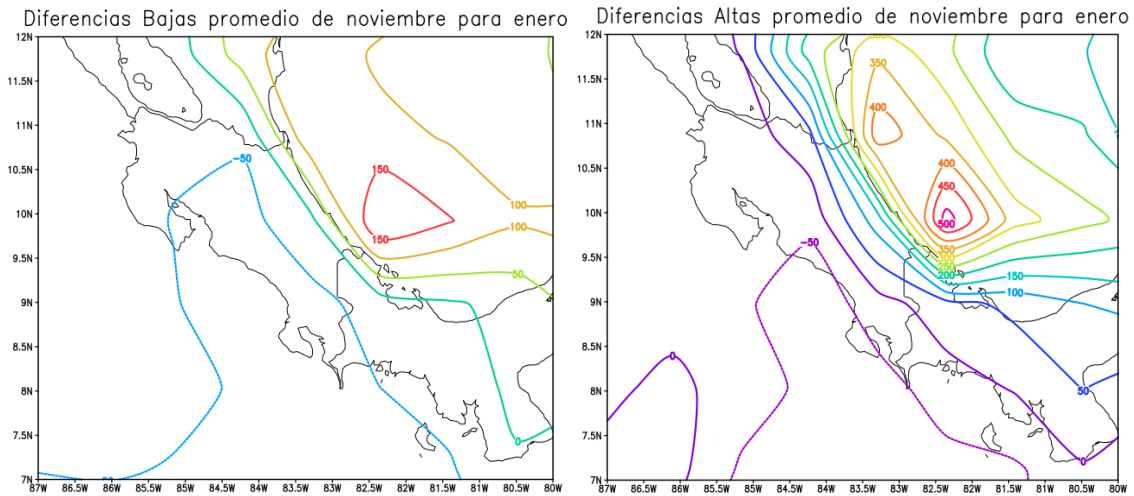


Figura A-6. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de noviembre del CFSv2 para el mes de enero y la estimación satelital de PERSIANN.

Por otra parte, se observaron los años 1990, 1996, 1999, 2008 y 2012, con diferencias mayores a los 200 mm (promedio de dichas diferencias se muestran en la figura A-6).

11.7 Setiembre para el mes de febrero.

En el caso de los pronósticos del modelo en setiembre para febrero del año siguiente, se pueden notar varios años con diferencias bastante bajas, como fueron los años 1987 y 2012, con valores que no superan los 20 mm, además, están los años 1998, 2000, 2001, 2002, 2010, 2013 y 2015, con diferencias que no superan los 50 mm (el promedio de dichas diferencias se muestra en la figura A-7).

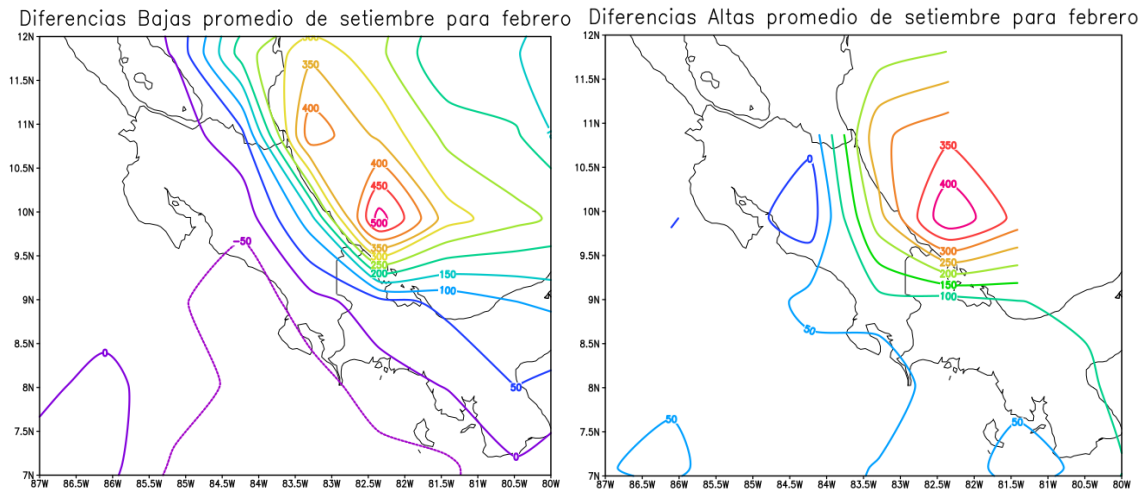


Figura A-7. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de setiembre del CFSv2 para el mes de febrero y la estimación satelital de PERSIANN.

Situación contraria, ocurre con el año 1991, que presenta diferencias que superan los 200 mm (figura A-7).

11.8 Octubre para el mes de febrero.

Para el mes de octubre, se tiene que entre los años con pronósticos que presentan diferencias menores con respecto a las estimaciones satelitales están los años 1994, 1998, 1999, 2001, 2002, 2013 y 2015, con diferencias que no superan los 50 mm (promedio de las diferencias en figura A-8).

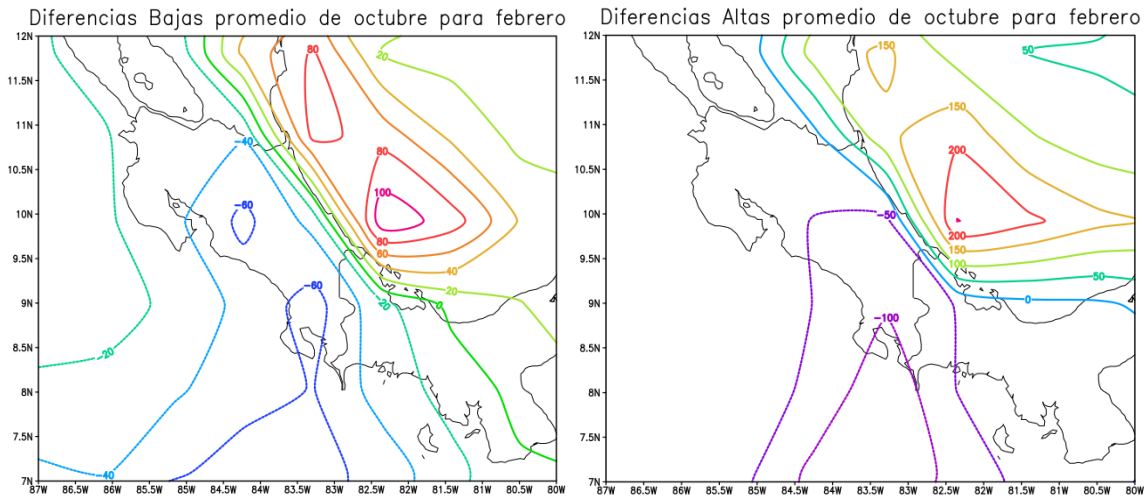


Figura A-8. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de octubre del CFSv2 para el mes de febrero y la estimación satelital de PERSIANN.

Caso contrario ocurre con los años 1996 y 2012 con valores superiores a los 150 mm (promedio de dichas diferencias en figura A-8).

11.9 Noviembre para el mes de febrero.

Finalmente, en las proyecciones de noviembre a febrero del año siguiente, se muestra como en los años 1990 y 2002, las diferencias son menores a los 50 mm, mientras que para los años 1987, 1998, 2000, 2001 y 2006, las diferencias son menores a los 60 mm (promedio de las diferencias en figura A-9).

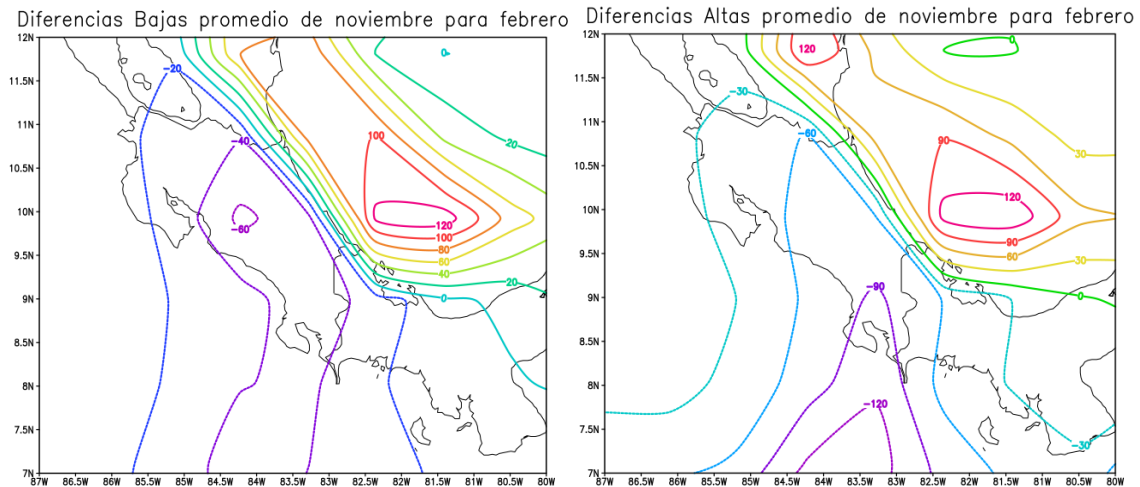


Figura A-9. Diferencias promedio (mm) entre el pronóstico del mes de noviembre del CFSv2 para el mes de febrero y la estimación satelital de PERSIANN.

Sin embargo, este período es el que muestra más años en los que las diferencias entre los pronósticos y las estimaciones satelitales son más amplias, ya que, en los años 1996, 1997, 2008, 2012 y 2017, las diferencias son mayores a los 150 mm (promedio de dichas diferencias en figura A-9).