



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Vol. 13 n.º 02 febrero 2026

PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068

"Reducción de la vulnerabilidad y
atención de emergencias por desastres"

En este boletín

- Procesos físicos asociados a las lluvias de verano en la vertiente occidental de los Andes peruanos: Estudio de caso con datos de radar meteorológico y modelamiento numérico en la cuenca del Río Rímac | **Pág. 4**
- Optimización de técnicos de compresión de pulsos para fortalecer los estudios de precipitación mediante el radar meteorológico SOPHy | **Pág. 13**
- Resumen del informe técnico de El Niño | **Pág. 17**
- Resumen de comunicado ENFEN | **Pág. 18**



Créditos

Nelly Paredes del Castillo
Ministra del Ambiente

Hernando Tavera Huarache
Jefe institucional

James Apaéstegui Campos
Director de Ciencias de la Atmósfera, Hidrósfera y Cambio Climático

Lina Godoy Encarnación
Coordinadora de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Fey Yamina Silva Vidal de Millones
Ken Takahashi Guevara
Joel Anicama Díaz
Editores

Roberto Carlos Encinas Colan
Diseño y diagramación

Carátula: Fotografía del radar SOPHy
Fuente: Instituto Geofísico del Perú

El boletín científico "El Niño" es generado en el marco del Programa Presupuestal n.º 068 "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres"

Producto 1: Estudios para la estimación del riesgo de desastres
Actividad 5: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño
Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, febrero de 2026

Puedes acceder a la colección completa de los [boletines científicos El Niño](#) escaneando el siguiente código QR.



Introducción

Los eventos El Niño y La Niña corresponden, a grandes rasgos, a situaciones en las que la temperatura de la superficie del mar está por encima o por debajo del promedio en el océano Pacífico ecuatorial. Estas fluctuaciones están fuertemente influenciadas por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es uno de los modos de variabilidad climática más importantes en el océano Pacífico que ejerce una gran influencia sobre el clima a nivel global y regional. La fase cálida de ENOS se puede denominar El Niño “global”.

En el Perú, los impactos de El Niño y La Niña son particularmente complejos debido a que recibimos influencias tanto costeras, asociadas a las fluctuaciones en el mar peruano en el Pacífico oriental, así como influencias remotas a través de teleconexiones atmosféricas desde el Pacífico central. En particular, El Niño en el Pacífico oriental o Costero puede producir lluvias y altas temperaturas en la costa y alterar el ecosistema marino-costero, mientras que El Niño en el Pacífico central o global puede reducir las precipitaciones e incrementar la temperatura en los Andes y en la Amazonía. Por el contrario, La Niña tendría efectos aproximadamente opuestos. Así, El Niño en el Pacífico oriental es el que causa mayores impactos para el Perú, ya que tiene el potencial de provocar grandes daños a infraestructuras, actividades económicas y, más importante, la seguridad y bienestar de las personas, además de sus medios de vida.

El Perú, como parte de la estrategia de gestión pública para enfrentar los peligros naturales, especialmente respecto a El Niño, establece el Programa Presupuestal por Resultados (PPR) 068 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. A partir de 2014, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), al igual que otras instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), participa en este PPR con el producto denominado “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”. Este consiste en la entrega oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural oceánico-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permitan la toma de decisiones de las autoridades a nivel nacional y regional.

A este producto, el IGP contribuye con la actividad “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”, la cual incluye la síntesis y evaluación de los modelos de pronóstico de El Niño generados internacionalmente, como es el caso de los modelos climáticos globales, así como de aque-

llos obtenidos a partir de modelos propios como el de predicción de ondas oceánicas ecuatoriales, el modelo de inteligencia artificial y el recientemente desarrollado modelo de Sistema Tierra regional de pronóstico para el territorio peruano y el océano Pacífico (IGP RESM-COW v1). Asimismo, incluye el desarrollo de investigaciones y estudios científicos que permiten entender la variabilidad climática y los procesos asociados al cambio climático, a fin de fortalecer, en forma continua, las capacidades para el pronóstico de El Niño.

En esta línea, el IGP ha estructurado y desarrollado el Boletín científico El Niño, un producto que contiene, en gran medida, los aportes científicos en el estudio y vigilancia del ENOS, con énfasis en El Niño. El Boletín, que se publica mensualmente desde 2014, cuenta con aportes nacionales e internacionales en diversos temas asociados a El Niño, sus impactos, procesos vinculados, temas asociados y otros igual de relevantes, que se presentan en las secciones de Divulgación Científica y Avances Científicos. De igual forma, se comparte en el Boletín una versión resumida del informe técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068 (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4974>). Dicho informe contiene información actualizada operativamente que el IGP proporciona como insumo para que el ENFEN genere en forma colegiada la evaluación final que será entregada a los usuarios. Finalmente, el Boletín presenta los comunicados ENFEN publicados durante el periodo correspondiente.

PROCESOS FÍSICOS ASOCIADOS A LAS LLUVIAS DE VERANO EN LA VERTIENTE OCCIDENTAL DE LOS ANDES PERUANOS: ESTUDIO DE CASO CON DATOS DE RADAR METEOROLÓGICO Y MODELAMIENTO NUMÉRICO EN LA CUENCA DEL RÍO RÍMAC

Aldo S. Moya-Álvarez^{1,2}, Yamina Silva Vidal¹, Elver Villalobos-Puma¹, Miguel Saavedra-Huanca¹, Carlos Del Castillo¹, Shailendra Kumar¹ y Jairo M. Valdivia-Prado¹

¹ Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú

² Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú



Ingeniero meteorólogo por el Instituto Hidrometeorológico de Odesa (Ucrania) y doctor en Ciencias Meteorológicas por el Instituto Meteorológico de Cuba. Entre 1994 y 2017 se desempeñó en el Servicio Meteorológico de Cuba, y posteriormente fue investigador adjunto del proyecto MAGNET del Instituto Geofísico del Perú. Sus líneas de investigación comprenden el modelamiento numérico y físico-estadístico aplicado al tiempo, el clima, las precipitaciones y la contaminación atmosférica. Actualmente es docente de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Palabras clave: observación por radar, cuenca del Rímac, eventos de precipitación, brisa marina, flujo amazónico, convergencia.

Citar como Moya-Álvarez, Silva-Vidal, Y., Villalobos-Puma, E., Saavedra-Huanca, M., Del Castillo, C., Kumar, S., & Valdivia-Prado, JM (2026). Procesos físicos asociados a las lluvias de verano en la vertiente occidental de los Andes peruanos: Estudio de caso con datos de radar meteorológico y modelamiento numérico en la cuenca del río Rímac. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 13 n.º 02, págs. 4-12.

¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?

Esta investigación identifica las condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia de lluvias intensas en la vertiente occidental de los Andes peruanos, tomando como caso de estudio un evento registrado en la cuenca del río Rímac. El estudio muestra que las precipitaciones en dicho evento se generaron por la interacción entre el transporte de humedad desde el Amazonas y la circulación local de la brisa marina. Además, evalúa la capacidad del modelo atmosférico WRF para representar estos eventos y demuestra el aporte de las observaciones de radar meteorológico para comprender mejor su desarrollo. Estos resultados contribuyen a mejorar el monitoreo y el pronóstico de lluvias intensas, proporcionando información científica que puede fortalecer los sistemas de alerta temprana y apoyar la gestión del riesgo de desastres y la planificación de medidas preventivas en zonas expuestas a inundaciones y deslizamientos.

Resumen

La predicción de la precipitación es un desafío en muchas regiones del mundo; sin embargo, en Lima resulta particularmente difícil porque son poco frecuentes y pueden originarse

por distintos mecanismos atmosféricos. Este artículo estudia las condiciones de circulación sinóptica y local que dieron origen a un evento de precipitación registrado el 15 de febrero de 2018 en la cuenca del río Rímac, el cual también afectó a la ciudad de Lima. Para ello, se utilizaron mediciones de precipitación in situ, información del radar PX-1000 y resultados del modelo numéri-

co WRF. Además, para el análisis sinóptico se empleó información del Centro Nacional de Información Ambiental de los Estados Unidos (NCEI). El análisis muestra que el flujo húmedo proveniente del Amazonas tuvo un papel central en el evento. Un resultado relevante es que la brisa marina diurna se mantuvo del mar hacia la tierra durante la noche, aunque con menor intensidad. Asimismo, se observó la influencia de la circulación anticiclónica en niveles altos sobre la región. Finalmente, el modelo WRF representó de manera aceptable las características generales del evento, aunque subestimó la precipitación observada.

1. Introducción

La costa peruana se caracteriza por tener un clima seco, mientras que las precipitaciones en la cordillera de los Andes presentan un comportamiento diferente entre la vertiente orientada hacia el océano Pacífico y la vertiente orientada hacia el océano Atlántico. Las zonas más lluviosas del Perú se concentran en la vertiente atlántica de la sierra y en la selva, ubicada al este a lo largo de la cordillera. En esta región se registran las lluvias más significativas del país, especialmente entre diciembre y abril, periodo que coincide con la temporada de lluvias. Este tema ha sido tratado en los trabajos de Silva et al. (2008) y Garreaud (2009).

Sin embargo, entre la sierra y la costa del Pacífico existe una zona de transición donde también se producen precipitaciones. Estas pueden estar asociadas con la llegada de lluvias provenientes de la Amazonía (Garreaud, 1999), que logran cruzar los Andes cuando el flujo sinóptico del este es predominante e intenso. En ciertos momentos del día, estas lluvias pueden verse favorecidas ocasionalmente en ciertos momentos del día por la convergencia del flujo sinóptico del este y la circulación local de las brisas del oeste, las cuales penetran la zona pre-montañosa de la cordillera de los Andes. En esta zona de transición se encuentra la cuenca del río Rímac (Figura 1), que nace en la parte alta de la sierra y desemboca en la costa, donde se ubica la ciudad de Lima.

Los Andes peruanos están expuestos a deslizamientos de tierra que ocurren principalmente en las partes alta y media de las cuencas, debido a la pendiente y a la ocurrencia de lluvias intensas. Estos eventos son frecuentes en la vertiente del Pacífico, región donde se concentra gran parte de la población peruana. En particular, en Chosica, ubicada en la región Lima, es una de las zonas donde los deslizamientos generan mayores impactos y pérdidas económicas. Además, el río Rímac es una de las principales fuentes de agua potable para los más de 10 millones de habitantes de la capital.

La zona de Chosica, en la cuenca del río Rímac, fue gravemente afectada por las lluvias asociadas con el fenómeno meteorológico conocido como El Niño Costero en 2017 (Takahashi, 2017). Estas lluvias activaron diferentes quebradas, provocando deslizamientos de tierra y generaron pérdidas materiales y económicas. Por este motivo, en el marco del proyecto "Modelado hidrodinámico de lluvia y deslizamientos de tierra en Chosica, Lima", el IGP trajo al Perú el radar meteorológico PX-1000 de banda X, en colaboración con la Universidad de Oklahoma (EE. UU.). El objetivo fue realizar una campaña de medición de lluvia entre enero y marzo de 2018 para modelar los deslizamientos de tierra,

evaluar las zonas afectadas y, contribuir al diseño de un sistema de alerta temprana para esta zona.

Los radares de banda X se utilizan ampliamente para detectar eventos de lluvia y emitir pronósticos a muy corto plazo de la ocurrencia de tormentas locales. Por ejemplo, Matrosov et al. (2005) analizaron la utilidad de un radar polarimétrico de banda X para estimar parámetros de precipitación en la costa oeste de Estados Unidos. Asimismo, Kato y Maki (2009) utilizaron un radar polarimétrico de banda X para estudiar lluvias locales intensas ocurridas en Japón. Estos antecedentes muestran la utilidad de este tipo de radar para observar eventos de precipitación de alta variabilidad espacial y temporal.

Los días 15 y 18 de febrero de 2018 se registraron dos eventos de precipitación en la región, los cuales incluso produjeron lluvia en el área metropolitana de Lima, donde la precipitación anual apenas supera los 5 mm. Debido a su relevancia, estos eventos constituyen el marco de esta investigación; sin embargo, el análisis se concentra, como estudio de caso, en el evento del día 15. Durante ambos eventos, se registraron precipitaciones en distintos puntos de la cuenca del río Rímac. En algunos casos, los registros superaron el percentil 95 de su climatología, por lo que pueden considerarse precipitaciones significativas. Los valores más altos superaron los 20 mm en 24h en Carampoma el día 18 y los 15 mm en 24h en Otao el día 15. En esta cuenca, los deslizamientos de tierra ocurren con relativa frecuencia y pueden provocar el cierre de vías de acceso entre la sierra y la capital, además de otras consecuencias para la población local. En este contexto, este trabajo evalúa las condiciones de circulación sinóptica y local que dieron origen al evento del 15 de febrero, registrado por el radar meteorológico PX-1000. Este radar se ubicó en la cima de una colina, a 2 900 m sobre el nivel del mar, lo que permitió monitorear el evento en la cuenca del río Rímac. Además, se presentan los resultados del modelamiento atmosférico realizado con el modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF, por sus siglas en inglés) (Skamarock, 2008). Un aspecto importante de la investigación es la evaluación del rol de la brisa costera en la formación y desarrollo de la precipitación en la vertiente occidental de los Andes, un tema sobre el cual se identifican pocos antecedentes específicos en la literatura científica sobre precipitación en el Perú, aunque fue tratado por Takahashi (2004) en su investigación sobre las precipitaciones en Piura.

Finalmente, se evalúa la habilidad del modelo WRF para representar este evento y se destaca la necesidad de contar con observaciones de radar para estudiar precipitaciones en regiones de topografía compleja. El modelo WRF se ha utilizado en otras regiones montañosas (Jiménez et al., 2013; Weckwerth, 2014; Gerber et al., 2018; Jiménez-Estève et al., 2018; Golzio et al., 2020). En el Perú, las principales experiencias se han desarrollado en los Andes centrales (Junquas et al., 2017, Moya et al., 2018a, b, 2019a, b y 2020). En particular, Moya et al. (2018a), evaluaron los esquemas de parametrización física que mejor representan la distribución espacial y temporal de la precipitación en los Andes centrales peruanos. Cabe destacar que el presente estudio fue publicado en Moya et al. (2025).

2. Datos y metodología

2.1 Condiciones sinópticas y datos de precipitación y radar

Para el análisis de la circulación general a escala sinóptica que prevaleció durante el evento, se utilizaron datos del Centro Nacional de Información Ambiental de los Estados Unidos (NCEI) (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>), correspondientes a las 12 UTC (análisis). Los datos tienen una resolución de 0,5°.

Los datos de precipitación utilizados corresponden a 11 estaciones ubicadas en la cuenca del río Rímac, cuya distribución espacial se muestra en la Figura 1. Para cada estación se calcularon los percentiles 25 %, 50 %, 75 % y 95 % del período 1981-2010. La numeración de las estaciones coincide con la lista mostrada en la Tabla 1. También se utilizó información del radar PX-1000 ubicado en la zona de estudio (punto rojo en la Figura 1). El PX-1000 es un radar meteorológico compacto, transportable y de doble polarización en banda X. Fue desarrollado en el Centro de Investigación Avanzada de Radares de la Universidad de Oklahoma.

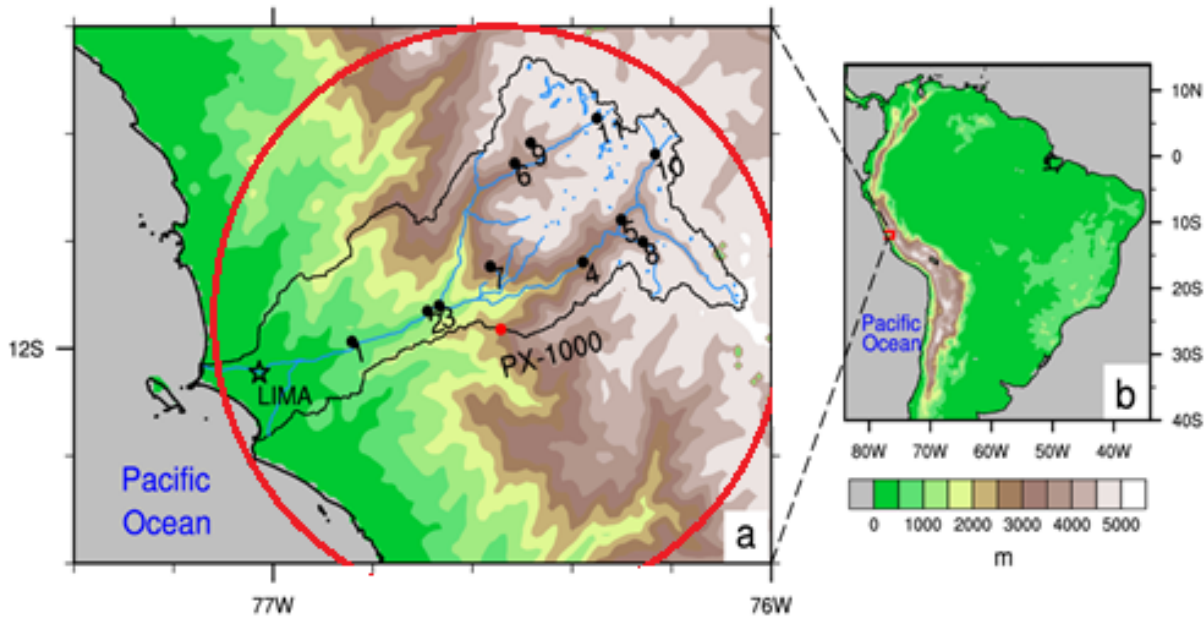


Figura 1. Área de estudio: franja de transición entre la cordillera de los Andes y la costa central del Perú, donde se ubica la cuenca del río Rímac, marcada con el contorno negro. El círculo rojo delimita el área de cobertura del radar.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación.

N°	Estación	Longitud (grados)	Latitude (grados)	Altitud (m)
1	Nana	-76.842	-11.987	543
2	Chosica	-76.690	-11.930	867
3	Santa Eulalia	-76.667	-11.920	970
4	Matucana	-76.378	-11.839	2417
5	San Mateo	-76.301	-11.760	3015
6	Carampoma	-76.515	-11.655	3424
7	SM-Otao	-76.564	-11.847	3506
8	San José de Parac	-76.258	-11.801	3829
9	Tingo	-76.483	-11.617	3980
10	Casapalca	-76.233	-11.638	4233
11	Milloc	-76.350	-11.571	4384

2.2 Configuración del modelo WRF

La simulación se realizó con el modelo WRF, versión 4.0, para dos dominios, cuyas características se especifican en la Tabla 2. El modelo se inició a las 00 UTC (Tiempo Universal

Coordinado). Las condiciones iniciales y de contorno se obtuvieron de los Análisis Finales Operacionales Globales (FNL) del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP), disponibles en línea. Estos datos tienen una resolución temporal de 6 h y una resolución horizontal de 1° x 1°.

Tabla 2. Principales características de los dominios y condiciones iniciales y de frontera.

Características	Dominio 1	Dominio 2
Resolución	10 km	2 km
Dimensiones	164 x 157 x 35	186 x 181 x 35
Condiciones iniciales y de frontera	FNL 1.ºx 1.º	Simulación del dominio 1

Los esquemas de parametrización en las simulaciones se definieron con base en resultados previos de estudios de sensibilidad obtenidos en Moya et al. (2018a) y Moya et al. (2019b) para los Andes centrales peruanos.

- Capa límite de Yonsei University Scheme (Hong et al., 2006).
- Capa superficial: esquema de similitud MM5 (Paulson, 1970; Dyer and Hicks, 1970; Webb, 1970; Zhang and Anthes, 1982).
- Radiación : esquema RRTMG (Iacono et al, 2008).
- Microfísica: esquema Morrison (Morrison and Milbrandt, 2015)
- Suelo: modelo Noah Unified Earth Surface Model (Tewari et al, 2004).
- Convección: esquema Grell-Freitas (Grell and Freitas, 2014).

3. Resultados

Los dos eventos generaron registros de lluvia que, en algunos momentos, superaron el percentil 95 de su climatología pluviométrica. La Figura 2 muestra las precipitaciones registradas en ambos eventos a partir de los registros pluviométricos de las estaciones consideradas. También muestra los valores de precipitación asociados a los percentiles 25, 50, 75 y 95 correspondientes a cada estación. En el caso del evento del 15 de febrero, los registros de lluvia de las estaciones de Nana, Chosica, Santa Eulalia, Matucana y SM-Otao superaron el percentil 95, mientras que en el caso del día 18, esto ocurrió en las estaciones de Matucana y Carampoma. Como se indicó previamente, este artículo evalúa las condiciones de circulación sinóptica y local que dieron origen al evento del 15 de febrero.

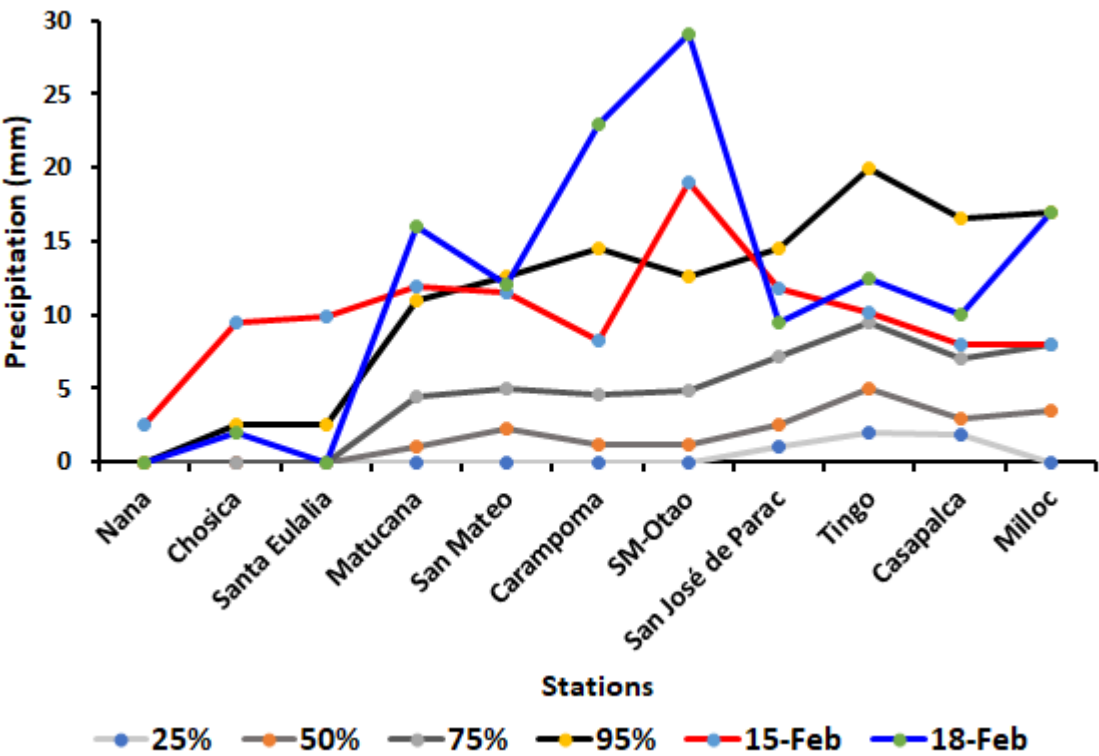


Figura 2. Precipitación registrada en los eventos del 15 y 18 de febrero de 2018, según los registros pluviométricos de 11 estaciones meteorológicas ubicadas en la región. Valores de precipitación asociados a los percentiles 25, 50, 75 y 95 correspondientes a cada estación.

3.1 Caso de estudio: 15 de febrero de 2018

Dada la complejidad de la región geográfica y la falta de datos de viento observados con la resolución necesaria para describir la circulación local, se utilizaron los resultados del modelo WRF, correspondientes al dominio 2, para describir la dinámica de formación y propagación de la precipitación sobre el área de estudio. En adelante, cuando se haga referencia a los resultados del modelo, se aludirá a este dominio de mayor resolución.

La Figura 3 muestra la circulación local del viento superficial (10 metros) sobre la región de estudio durante la tarde y noche del 15 de febrero. En general, se observa un flujo proveniente de la región oriental de la Amazonía, que logra cruzar la cordillera de los Andes hacia la costa. Sin embargo, la circulación entre la costa y la cordillera presenta características diferentes según el momento del día. A las 13, hora local (en lo adelante siempre se indicará la hora local), se observa un flujo del oeste proveniente de la costa, que responde a la circulación local de brisas, la cual se distingue del viento sinóptico predominante sobre el océano, generalmente del sur. Cabe señalar también que este flujo más occidental se percibe con mayor intensidad entre las 13 y las 16 horas, luego se debilita y tiende a desaparecer hacia la tarde, lo que corresponde a las características típicas de la circulación de la brisa. Esto se deduce del hecho de que no se observa en las horas previas, aparece cerca del mediodía y desaparece al final de la tarde y al anochecer. De hecho, a las 16 horas se observa que el mencionado flujo occidental está más debilitado, desapareciendo por completo a las 19 horas.

Durante la tarde, el flujo occidental procedente de la costa converge con el flujo del Este procedente de la Amazonía. Esta interacción genera una zona de convergencia casi paralela a la cordillera y la costa, lo que favorece el desarrollo de movimientos verticales ascendentes del aire, fundamentales en la formación de nubes y precipitaciones. Esta situación persiste en cierta medida a las 16 horas, pero al final de la tarde vuelve a predominar el flujo sinóptico del este. Sin embargo, cabe señalar que a las 19 horas todavía persiste una débil corriente procedente de la costa y, a las 22 horas aún no ha desaparecido por completo. Tampoco se observa claramente el cambio característico en el régimen de brisa.

Para confirmar si la corriente del oeste procedente de la costa corresponde realmente al régimen de brisa costera, se evaluaron los contrastes de temperatura entre el aire sobre tierra y el aire sobre el mar, los cuales originan físicamente la circulación local de las brisas. La Figura 4 muestra los campos de temperatura a las 14 horas del día 15 y a las 16 horas del día 16, así como los flujos de viento correspondientes a 10 m. A las 14 horas del día 15 existe un marcado contraste de temperatura entre el aire sobre el océano y el aire sobre tierra, lo que deja claro que la corriente que penetra desde la costa hacia la cuenca corresponde a la circulación de la brisa marina. Además, en la Figura 4b se observa que en la madrugada todavía persiste un flujo desde la costa hacia la cuenca, aunque debilitado. Esto se debe al ligero contraste entre el aire sobre el océano y el aire sobre tierra, donde la temperatura es más alta durante todo el día. Es

decir, la brisa marina se mantiene durante toda la noche sin cambiar de dirección. Esto último puede estar relacionado con el hecho de que la influencia de la Corriente de Perú mantiene aire frío sobre el mar en esta zona durante todo el día (24 horas), impidiendo o limitando el cambio de dirección de la brisa entre el día y la noche.

La Figura 5 muestra el perfil vertical de la componente zonal del viento sobre un punto situado ligeramente por debajo del centro de la cuenca. En esta figura, la variable presenta valores positivos en los niveles inferiores, se aproxima a cero con la altura y luego alcanza valores negativos por encima de los 1600 m. Esto indica un cambio en la dirección del viento: del oeste en niveles bajos al este en niveles más arriba, una característica típica de la circulación de la brisa.

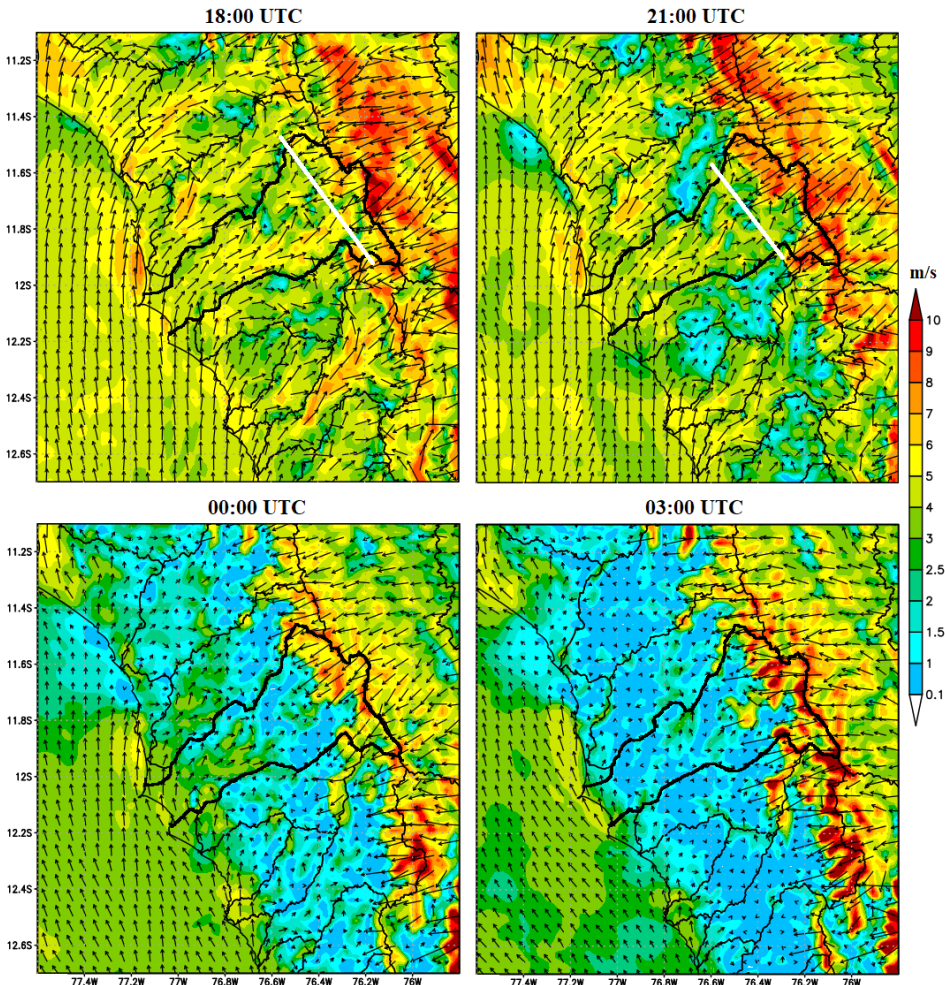


Figura 3. Circulación del viento (a 10 m) sobre la región de estudio. Los límites de la cuenca del Rímac se muestran con una línea gruesa. Se presentan los campos correspondientes a la tarde y la noche del 15 de febrero: 13 horas (a), 16 horas (b), 19 horas (c) y 22 horas (d).

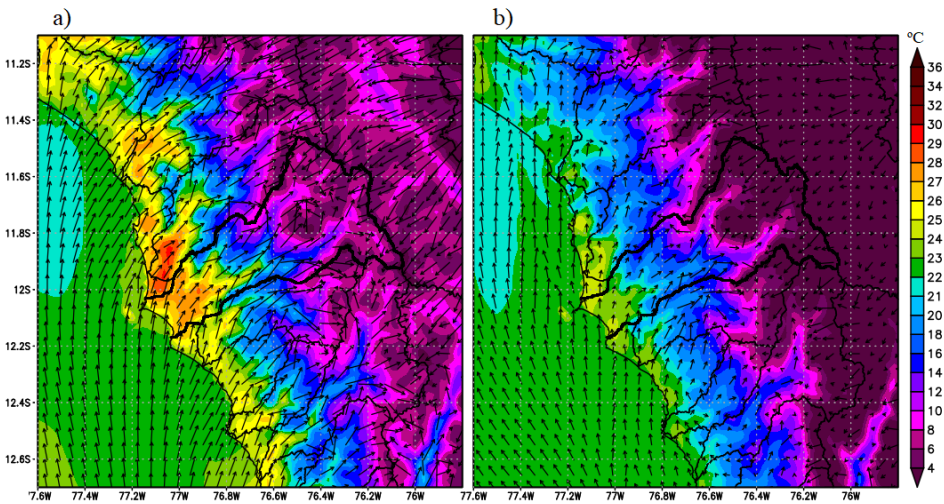


Figura 4. Campo de temperatura superficial (a 2 m) y flujo de viento (a 10 m) a las 14 horas del 15 de febrero (a) y a las 02 horas del 16 de febrero (b). Los límites de la cuenca del Rímac se han resaltado para distinguirla del resto de las cuencas.

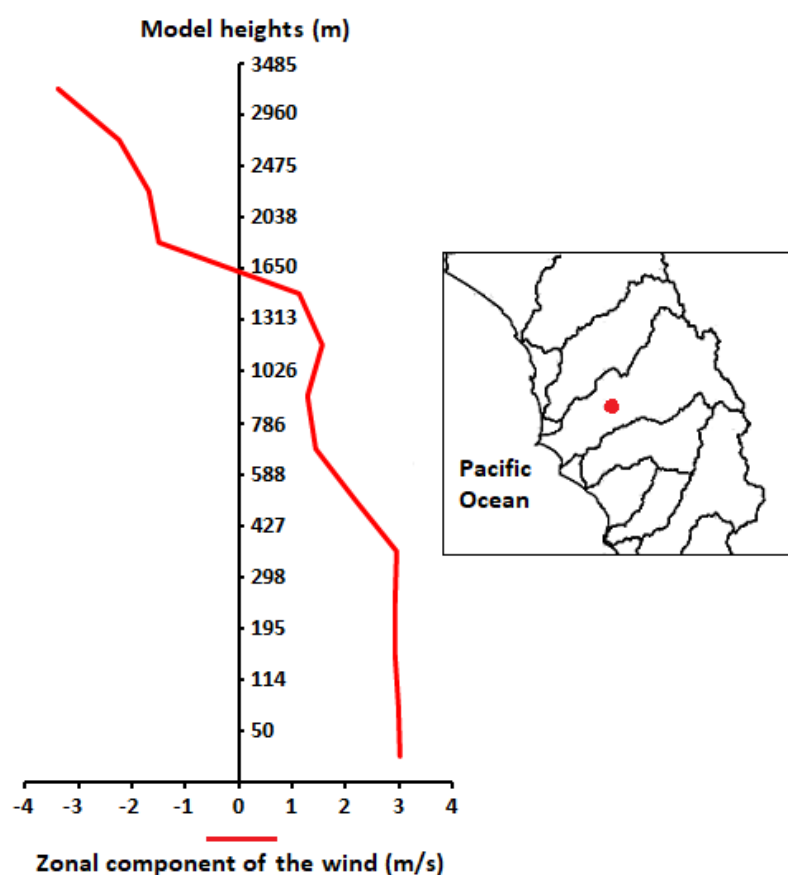


Figura 5. Perfil vertical de la componente zonal del viento simulada por el modelo WRF sobre el punto ubicado a 11.85° de latitud sur y 76.7° de longitud oeste, a las 14 horas del 15 de febrero de 2018.

Como se señaló en la introducción, y de acuerdo con Garreaud (1999), en esta región el flujo del este proviene del Amazonas y transporta humedad a lo largo de la cordillera andina y hacia su vertiente occidental. La Figura 6 muestra el campo de humedad específico a 500 hPa y el flujo del viento al mismo nivel para la tarde del 15 de febrero de 2018. Se observa un flujo general del este proveniente del Amazonas, que transporta vapor de agua hacia la cuenca del Rímac. Esta configuración confirma lo sugerido en estudios previos respecto al transporte de humedad desde el Amazonas hacia la vertiente occidental de los Andes peruanos.

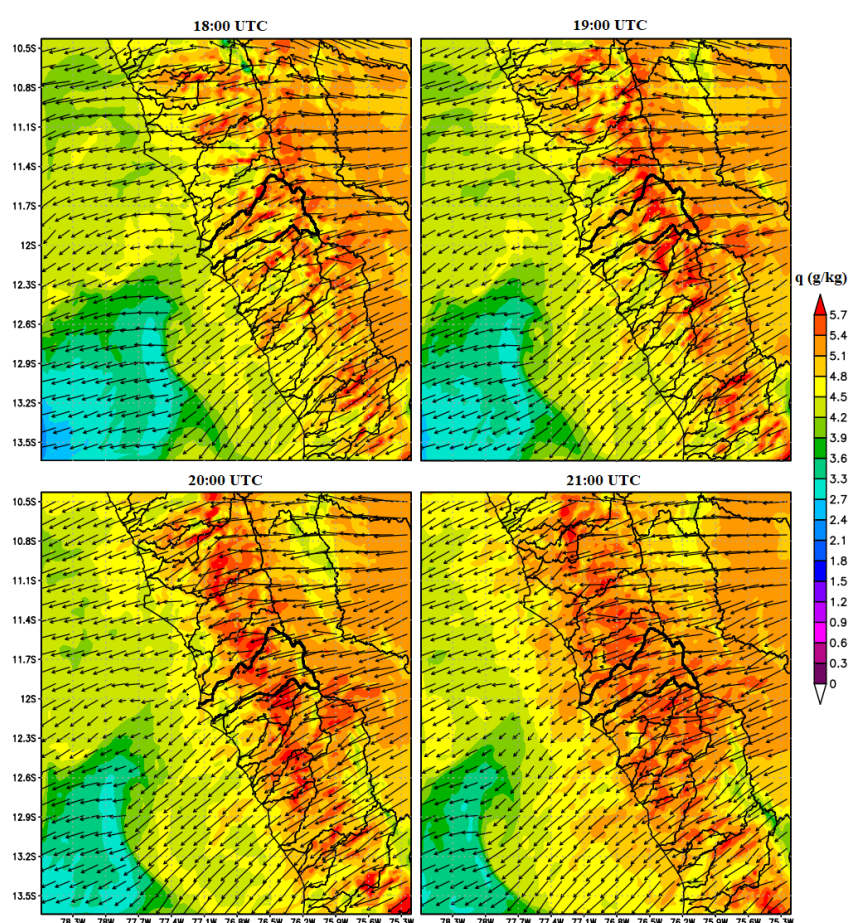


Figura 6. Campo de humedad específica y circulación del

viento a 500 hPa sobre la región de estudio. Los límites de la cuenca del Rímac se muestran con una línea gruesa. Se presentan los campos correspondientes al 15 de febrero a las 13, 14, 15 y 16 horas.

La figura 7 muestra la coincidencia entre la imagen del radar PX-1000 a las 16 horas y el campo de precipitación del modelo entre las 16 y las 17 horas. En ambos casos, se observan áreas de precipitación sobre la parte central de la cuenca. La imagen del radar no ha sido procesada, por lo que se observa un semicírculo de eco fijo, relacionado con la complejidad orográfica del área donde se desplegó el radar. Sin embargo, esta señal fija no impide identificar las áreas de precipitación relevantes para el análisis.

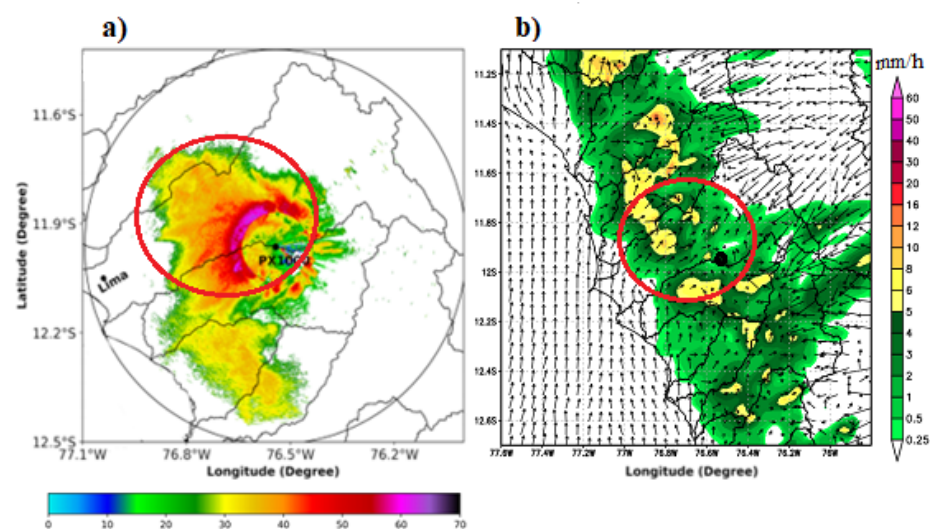


Figura 7. Imágenes de radar PX-1000, reflectividad (dBZ) correspondiente a las 16 horas (a) y precipitación acumulada entre las 16 y las 17 horas del 15 de febrero de 2018.

La Figura 8 muestra la precipitación acumulada en 24 horas simulada por el modelo WRF y registrada por la red pluviométrica de la cuenca del río Rímac. En esta figura se observa una correspondencia entre los registros de precipitación y la salida del modelo. Aunque el modelo subestimó la precipitación registrada, existe una buena correlación entre ambos conjuntos de datos ($R=0,73$). La desviación absoluta media del pronóstico con respecto a la observación fue de 6,7 mm, mientras que el sesgo fue de -5,7 mm, lo que confirma que el modelo subestimó la precipitación que ocurrió. La precipitación más notable se registró en la estación SM-Otao. Moya et al. (2020) mostraron que el WRF, sobre los Andes centrales, tiende a subestimar el calentamiento de la capa límite inferior, lo que hace que la capa límite del modelo sea más estable que la capa límite real. Esto puede llevar a que el modelo subestime la precipitación para eventos de precipitación significativos, como demostraron Moya et al. (2018b).

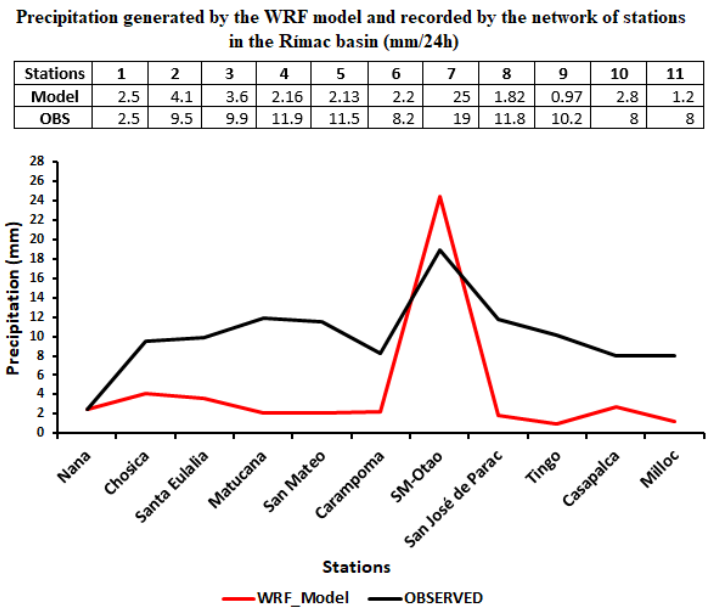


Figura 8. Precipitación (mm en 24h) registrada por la red pluviométrica en la cuenca del Rímac y generada por el modelo WRF para el 15 de febrero de 2018. Los números de estación indicados en el eje X corresponden a la numeración presentada en la Tabla 1, de izquierda a derecha.

3. Conclusiones

- El análisis de la dinámica del evento confirmó la importancia del transporte de humedad desde la Amazonía hasta los Andes y mostró que, en algunos casos, este flujo puede favorecer la ocurrencia de precipitaciones en la vertiente occidental de la cordillera, incluso en zonas cercanas a la costa del Pacífico.
- Se identificó el papel de la brisa costera en la formación y desarrollo de las precipitaciones en la vertiente occidental de los Andes. Esta circulación puede influir en la distribución espacial de la lluvia dentro de la cuenca, especialmente en se concentran hacia la cuenca alta o hacia la cuenca baja.
- La zona donde converge la circulación de las brisas marinas con el flujo del este proveniente de la Amazonía ayuda a explicar la ubicación de las áreas de mayor precipitación. Este resultado muestra la importancia de analizar conjuntamente los procesos regionales y locales que intervienen en estos eventos.
- Durante la noche, el viento del oeste asociado a la brisa se debilitó, pero no desapareció. Es decir, no se observó con claridad el desarrollo de una brisa terrestre dirigida desde la tierra hacia el mar. Consistente con esto, el aire en tierra permanece más caliente que el aire sobre el mar.
- Las imágenes de radar mostraron claramente los ecos asociados al evento de precipitación, lo que evidencia la utilidad del radar para observar eventos de lluvia en zonas de topografía compleja.
- Las simulaciones del modelo WRF representaron de manera aceptable las características generales del evento, aunque subestimaron la precipitación observada. La correlación entre la simulación y la observación fue superior a 0,7, lo que indica una correspondencia razonable entre ambas fuentes de información.

Agradecimientos

Proyecto: “Implementación de sistemas de alerta temprana de deslizamientos de tierra y lodo mediante radares geofísicos en Huancavelica, Junín y Lima”, Etapa I. “Modelización hidrogeodinámica de lluvias y deslizamientos de lodo en Chosica, Lima” (D.S. N.º 312-2017-EF), financiado por FONDES (Fondo para Intervenciones ante Ocurrencia de Desastres Naturales).

Proyecto “MAGNET-IGP: Fortalecimiento de la línea de investigación en física y microfísica de la atmósfera (Convenio N.º 010-2017-FONDECYT)”. Este trabajo se realizó utilizando recursos computacionales, HPC-Linux Cluster, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos Computacionales del Instituto Geofísico del Perú (becas 101-2014-FONDECYT, SPIRALES2012 IRD-IGP, Manglares IGP-IDRC, programa PP068. Se agradece a NCEP por los datos de análisis de FNL y a SENAMHI por los datos de precipitación superficial.

Referencias

Del Castillo-Velarde, C., Kumar, Sh., Valdivia-Prado, J. M., Moya-Álvarez, Aldo S., Flores-Rojas, J.L., Villalobos-Puma, E., Martínez-Castro, D., Silva-Vidal, Y. (2021). Evaluation of GPM Dual-Frequency Precipitation Radar Algorithms to Estimate Drop Size Distribution Parameters, Using Ground-Based Measurement over the Central Andes of Peru. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 597–619. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00242-5>

Dyer, A. J., & Hicks, B. B. (1970). Flux-gradient relationships in the constant fluxlayer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(410), 715–721. <https://doi.org/10.1002/qj.49709641012>

Garreaud, R. (1999). Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Monthly Weather Review*, 127(5), 901–921. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0901:maotsp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0901:maotsp>2.0.co;2)

Garreaud, R. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3–11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>

Gerber, F., Besic, N., Sharma, V., Mott, R., Daniels, M., Gabella, M., Berne, A., Germann, U., & Lehning, M. (2018). Spatial variability in snow precipitation and accumulation in COSMO–WRF simulations and radar estimations over complex terrain. *The Cryosphere*, 12(10), 3137–3160. <https://doi.org/10.5194/tc-12-3137-2018>

Golzio, A., Bollati, I. M., Luciani, M., Pelfini, M., & Ferrarese, S. (2020). Weather Simulation of Extreme Precipitation Events Inducing Slope Instability Processes over Mountain Landscapes. *Applied Science*, 10(12), 4243. <https://doi.org/10.3390/app10124243>

Grell, G. A., Freitas, & S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(10), 5233–5250. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>

- Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341. <http://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113(D13), D13103. <https://doi.org/10.1029/2008jd009944>
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Montáñez, J. P., García-Bustamante, E., Navarro, J., Vilà-Guerau de Arellano, J., & Muñoz-Roldán, A. (2013). An evaluation of WRF's ability to reproduce the surface wind over complex terrain based on typical circulation patterns. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(14), 7651–7669. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50585>
- Jiménez-Esteve, B., Udina, M., Soler, M. R., Pepin, N., & Miró, J. R. (2018). Land use and topography influence in a complex terrain area: A high resolution mesoscale modelling study over the Eastern Pyrenees using the WRF model. *Atmospheric Research*, 202, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.012>
- Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinosa, J.-C., Chavez, S., Sicart, J.-E., & Lebel T (2017). Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics*, 50(11–12), 3995–4017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>
- Kato, A., & Maki, M. (2008). Localized Heavy Rainfall Near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 Observed by X-band Polarimetric Radar — Preliminary Analysis —. *SOLA*, 5, 89–92. <https://doi.org/10.2151/sola.2009-023>
- Kumar, Sh., Silva, Y. Moya-Álvarez, A. S., & Martínez-Castro, D. (2019a). Seasonal and Regional Differences in Extreme Rainfall Events and Their Contribution to the World's Precipitation: GPM Observations. *Advances in Meteorology*, 2019, 4631609. <https://doi.org/10.1155/2019/4631609>
- Kumar, Sh., Silva, Y. Moya-Álvarez, A. S., & Martínez-Castro, D. (2019b). Effect of the surface wind flow and topography on precipitating cloud systems over the Andes and associated Amazon basin: GPM observations. *Atmospheric Research*, 225, 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.027>
- Matrosov, S. Y., Kingsnill, D. E., & Ralph, F. M. (2005). The utility of X-band polarimetric radar for quantitative estimates of rainfall parameters., *Journal of Hydrometeorology*, 6(3), 248–262. <https://doi.org/10.1175/jhm424.1>
- Morrison, H., & Milbrandt, J. A. (2015). Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part I: Scheme description and idealized tests. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(1), 287–311. <https://doi.org/10.1175/jas-d-14-0065.1>
- Moya-Álvarez, A., Silva, Y., Villalobos-Puma, E., Saavedra H., M., Castillo, C., Kumar, S., & Valdivia, J. (2025). Extreme precipitation events associated with summer rains in the western slope of the Peruvian Andes using numerical modeling and weather radar data: Case studies. *Pure and Applied Geophysics*, 182, 4743–4769. <https://doi.org/10.1007/s00024-025-03834-8>
- Moya-Álvarez, A. S., Estevan, R., Kumar, S., Flores, J. L., Ticse, J. J., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2020). Influence of PBL parameterization schemes in WRF_ARW model on short-range precipitation's forecasts in the complex orography of Peruvian Central Andes. *Atmospheric Research*, 233, 104708. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104708>
- Moya-Álvarez, A. S., Gálvez, J., Holguín, A., Estevan, R., Kumar, S., Villalobos, E., Martínez-Castro, D., & Silva Y. (2018). Extreme Rainfall Forecast with the WRF-ARW Model in the Central Andes of Peru. *Atmosphere*, 9(9), 362. <https://doi.org/10.3390/atmos9090362>
- Moya-Álvarez, A. S., Martínez-Castro, D., Estevan, R., Kumar, S., & Silva Y (2019). Response of the WRF model to different resolutions in the rainfall forecast over the complex Peruvian orography. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3-4), 2993–3007. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02782-3>
- Moya-Álvarez, A. S., Martínez-Castro, D., Flores, J. L., & Silva, Y. (2018). Sensitivity Study on the Influence of Parameterization Schemes in WRF-ARW Model on Short- and Medium-Range Precipitation Forecasts in the Central Andes of Peru. *Advances in Meteorology*, 1381092. <https://doi.org/10.1155/2018/1381092>
- Moya-Álvarez, A. S., Martínez-Castro, D., Kumar, S., Flores, J. L., Estevan, R., Saavedra-Huanca, M., & Silva, Y. (2020). Statistical characterization of vertical meteorological profiles obtained with the WRF-ARW model on the central Andes of Peru and its relationship with the occurrence of precipitation on the region. *Atmospheric Research*, 239, 104915. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104915>
- Paulson, C. A. (1970). The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal Applied Meteorology*, 9(6), 857–861. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009<0857:T-MROWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009<0857:T-MROWS>2.0.CO;2)
- Silva, Y., Takahashi, K., & Chávez, R. (2008). Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances in Geosciences*, 14, 261–264. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-261-2008>
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. University Corporation for Atmospheric Research. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Takahashi, K. (2004). The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997--1998 and 2002 El Niño events. *Annales Geophysicae*,

22(11), 3917–3926, <https://doi.org/10.5194/angeo-22-3917-2004>.

Takahashi, K. (2017). Fenómeno El Niño: Global vs “Costero”. En Mosquera Vásquez, K. A. (Ed.), *Avances de la ciencia de El Niño: colección de artículos de divulgación científica 2017* (pp. 4–7). Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/2744>

Tewari, F., Chen, W., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., & Cuenca, R. H. (2004, January 14). Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. [presentation]. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, US. <https://n2t.org/ark:/85065/d7fb523p>

Webb, E. K. (1970). Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(407), 67–90. <https://doi.org/10.1002/qj.49709640708>

Weckwerth, T. M., Bennett, L. J., Jay Miller, L., Van Baelen, J., Di Girolamo, P., Blyth, A. M., & Hertneky, T. J. (2014). An observational and modeling study of the processes leading to deep, moist convection in complex terrain. *Monthly Weather Review*, 142(8), 2687–2708. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00216.1>

Zhang, D. & Anthes, R. A. (1982). A high-resolution model of the planetary boundary layer— sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data. *Journal of Applied Meteorology*, 21(11), 1594–1609. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)021<1594:AHRMOT>2.0](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)021<1594:AHRMOT>2.0)

OPTIMIZACIÓN DE TÉCNICAS DE COMPRESIÓN DE PULSOS PARA FORTALECER LOS ESTUDIOS DE PRECIPITACIÓN MEDIANTE EL RADAR METEOROLÓGICO SOPHY

David Evangelista¹, Juan Carlos Espinoza¹ y Danny Scipión¹

¹ Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú

Palabras clave: radar meteorológico SOPHy, compresión de pulsos, señal chirp, sensibilidad, rango ciego

Citar como Evangelista, D., Espinoza, J.-C., & Scipión, D. (2026). Optimización de técnicas de compresión de pulsos para fortalecer los estudios de precipitación mediante el radar meteorológico SOPHy. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 13 n.º 02 págs. 13-16.

¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?

Este estudio fortalece el desempeño del radar meteorológico SOPHy, una herramienta fundamental para vigilar las lluvias y otros fenómenos atmosféricos en la región central del Perú. Gracias a una nueva técnica de transmisión de señales, el radar ahora detecta con mayor precisión las precipitaciones, reduce las zonas cercanas donde antes no registraba información y amplía el rango de velocidades que puede medir. Esto significa datos más claros y confiables sobre lo que ocurre en la atmósfera. Para quienes trabajan en gestión integral del cambio climático y reducción del riesgo de desastres, disponer de información precisa permite anticipar escenarios, planificar mejor y sustentar decisiones que protejan infraestructuras, actividades económicas y comunidades vulnerables.

Resumen

El radar meteorológico SOPHy, desarrollado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), es un sistema de doble polarización que opera en la banda X. Se ubica actualmente en Huanca-yo, donde contribuye al estudio de las precipitaciones y de los fenómenos atmosféricos de la región. Su tecnología de transmisión se basa principalmente en amplificadores de estado sólido, ampliamente utilizados en radares meteorológicos por su alta eficiencia energética. Estos amplificadores operan a baja potencia, por lo que es necesario aplicar técnicas de compresión de pulsos para lograr un rango de alcance adecuado. La técnica inicialmente utilizada no permitía operar el amplificador con su máxima eficiencia, alcanzando solo un 4 % de duty cycle. Para superar esta limitación, se desarrolló y evaluó una técnica de compresión de pulsos basada en señales chirp, cuyas nuevas características aprovechan mejor la potencia de transmisión, alcanzando ahora un 12 % de duty cycle. Los resultados verifican un aumento en la sensibilidad, así como en la reducción del rango ciego y el aumento de la velocidad máxima no ambigua. Estos avances podrían reforzar la capacidad de detección del radar y contribuir a mejorar la observación y el estudio de los fenómenos atmosféricos.

1. Introducción

Durante muchos años, los radares meteorológicos han aportado en el estudio de fenómenos atmosféricos y a la prevención de riesgos asociados a desastres naturales. En particular, los radares en banda X resultan especialmente útiles para detectar partículas pequeñas y proporcionar más información sobre las precipitaciones. Ejemplos de estos sistemas son el X-Pol de la University of Massachusetts Amherst (Venkatesh et al., 2008), el PX-1000 del Advanced Radar Research Center (ARRC) (Cheong et al., 2013) y el NXPol del National Centre for Atmospheric Science (NCAS) (Neely et al., 2018).

En este contexto, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) desarrolló un sistema transportable de radar definido por software, que emplea amplificadores de estado sólido con una frecuencia de operación en la banda X (Espinoza et al., 2021). El radar fue denominado SOPHy, sigla en inglés de Scanning-system for Observation of Peruvian Hydrometeorological-events. Fue diseñado utilizando dispositivos de radio definidos por software, en los cuales convertidores, amplificadores, y componentes analógicos conforman el sistema. Las principales características técnicas del radar SOPHy se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Características técnicas del radar meteorológico SOPHy.

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	9,345 GHz
Potencia pico	200 W
Rango de alcance	60 km
Pulse Repetition Time (PRT)	400 μs
Duty cycle máximo	15 %

En la Tabla 1, la potencia pico de transmisión emitida por el amplificador es de 200 W. El ajuste máximo de duty cycle es de 15 % correspondiente a un ancho de pulso de 60 μs. El radar SOPHy operaba mediante la transmisión de pulsos codificados basada en una modulación en fase denominada códigos complementarios. Este tipo de codificación permitía atenuar los lóbulos laterales, lo que mejoraba la precisión en la detección de objetivos. No obstante, la potencia transmitida estaba limitada por el número de códigos enviados, por lo que no era posible ajustar el ancho del pulso de transmisión a su nivel máximo, utilizando únicamente el 4 % de duty cycle. Por esta razón, se planteó el desarrollo de la técnica de compresión de pulsos basada en modulación en frecuencia, mediante la implementación de formas de onda chirp, cuyas propiedades podrían contribuir a mejorar la sensibilidad, reducir el rango ciego y ampliar la velocidad máxima no ambigua del radar.

2. Metodología

La forma de onda para la compresión de pulsos chirp es generada en la etapa de transmisión y consiste en una modulación en frecuencia dada por la Ecuación 1.

$$g(t) = u(t)exp[j\phi(t)] \tag{1}$$

Donde t es el tiempo, u(t) es la envolvente del pulso transmitido y Φ(t) la fase de la señal. La envolvente puede variar según los tipos de funciones ventana aplicadas. De acuerdo con Ózdemir (2012), las funciones ventana principales son la rectangular, la de Blackman y la de Kaiser. Según Das y Jena (2013), a partir de sus estudios sobre la aplicación de funciones ventana en compresión de pulsos chirp, la ventana de Blackman presenta el mejor desempeño.

De acuerdo con Qiu et al. (2013), se puede definir la fase (t) a partir de la Ecuación 2.

$$\Phi(t) = 2\pi\left(\frac{kt^2}{2} + f_0t\right) + \Phi_0 \tag{2}$$

Donde:

$k = \frac{BW}{T}$ es conocido como parámetro chirp e indica la relación entre el ancho de banda (BW) y el tiempo (T) de duración de la forma de onda chirp.
Φ₀ indica la fase inicial de la señal chirp.

f₀ es la frecuencia inicial de la señal chirp y también puede ser definida de acuerdo con la Ecuación 3.

$$f_0 = f_c - \frac{BW}{2} \tag{3}$$

Siendo f_c la frecuencia central de la señal.
La forma de onda chirp resultante se muestra en la Figura 1.

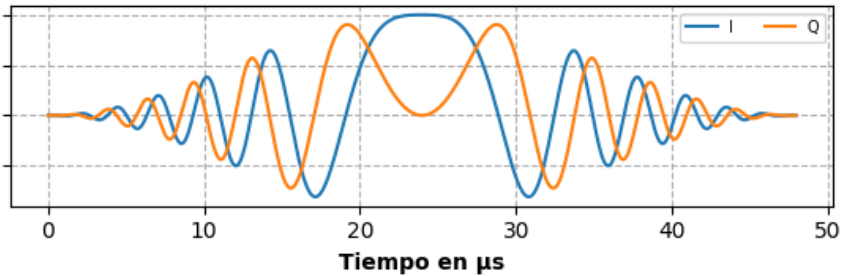


Figura 1. Forma de onda chirp.

Una de sus principales ventajas de la forma de onda chirp es la posibilidad de transmitir mayor potencia sin distorsionar los resultados y permitir modificar el ancho de pulso sin alterar la forma de la señal codificada. En este caso, la atenuación de los lóbulos laterales se logra mediante la aplicación de filtros o funciones ventanas en la señal, lo que proporciona un mejor control sobre la potencia transmitida al final. La transmisión de la forma de onda chirp emplea los parámetros mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros utilizados para la forma de onda chirp.

Parámetro	Valor
PRT	400 μs
Sample rate TX	20 MHz
Sample rate RX	2 MHz
Duty cycle	12 %
Ancho de pulso	40 μs
Ancho de banda	1 MHz
Función ventana	Blackman

De acuerdo con la Tabla 2, un 12 % de duty cycle de transmisión es empleado. En pruebas experimentales se alcanzó un duty cycle máximo del 13%, donde finalmente se estableció en 12 % para proteger el transmisor. Así también, la función ventana de Blackman es usada como filtro para atenuar los lóbulos laterales.

La forma de onda chirp por ser una señal continua en el tiempo y no requerir integraciones coherentes entre pulsos consecutivos, el rango de velocidades detectables se duplica respecto a la codificación por códigos complementarios.

La comparación de parámetros para cada técnica es mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de técnicas

Técnica	Códigos complementarios	Chirp
PRT	400 μ s	400 μ s
Ancho de pulso	16 μ s	48 μ s
Duty cycle	4 %	12 %
Técnica de supresión de lóbulos	Integraciones coherentes	Funciones ventana

Para el desarrollo de las pruebas, los datos fueron recolectados considerando como referencia los ecos de montaña ubicados alrededor del radar, próximos a las regiones de Chupaca, Concepción y Huancayo. Se consideró una elevación de 1°, buscando que no se presentaran eventos de lluvia para evitar interferencias en las primeras mediciones. Los pulsos de transmisión durante los experimentos fueron configurados con un DC de 12 % para el pulso largo y de 1 % para el pulso corto, equivalente a unos anchos de pulso de 48 μ s y 4 μ s, respectivamente.

3. Resultados

La Figura 2 muestra los resultados de la aplicación de la forma de onda chirp y de la codificación en fase, ambos analizados únicamente el ancho de pulso largo. Los dos paneles muestran una comparación de SNR en dB. Se puede visualizar el efecto del rango ciego para ambas técnicas y su relación con el tamaño del ancho de pulso de cada una.

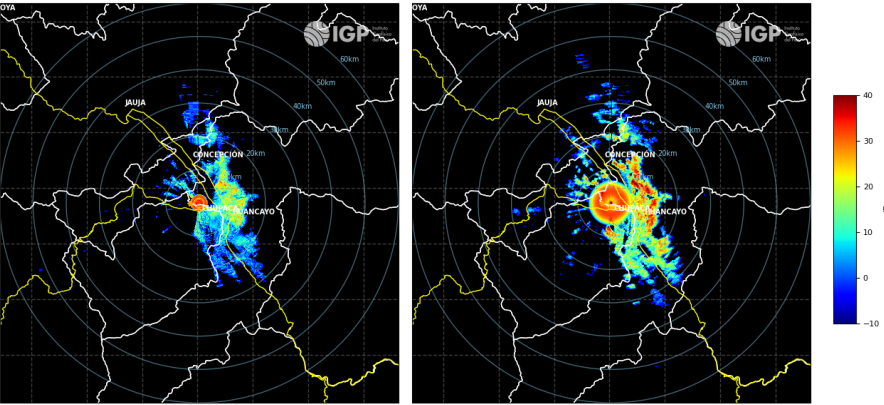


Figura 2. Resultado del nivel de SNR para la señal de códigos complementarios (izquierda) y la señal chirp (dere-

En la Figura 3, la SNR promedio efectiva total de los 360 ángulos de azimuth para la señal chirp y códigos complementarios es de 23,99 dB y 10,07 dB, respectivamente. Se verifica una variación promedio aproximada de 13,87 dB.

Estos resultados son consistentes con un aumento en la sensibilidad equivalente a un incremento de SNR de 13.87 dB.

La Figura 4 muestra los resultados de los momentos espectrales en un conjunto de datos seleccionado durante el evento de lluvia del 9 de noviembre de 2025.

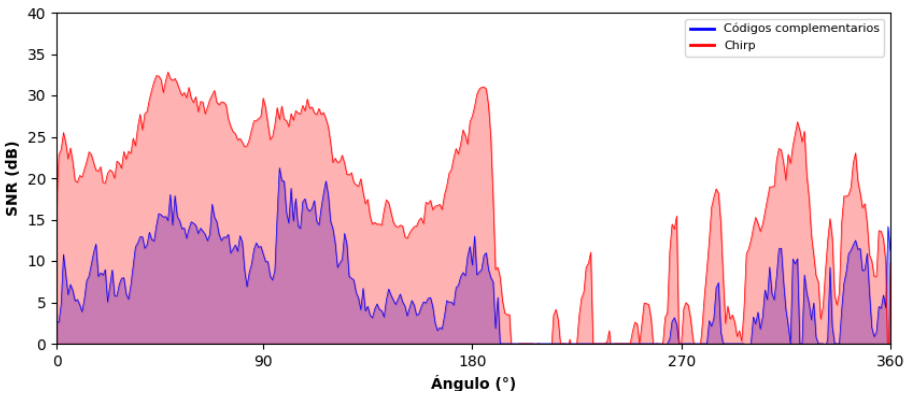


Figura 3. Comparación de SNR promedio efectiva.

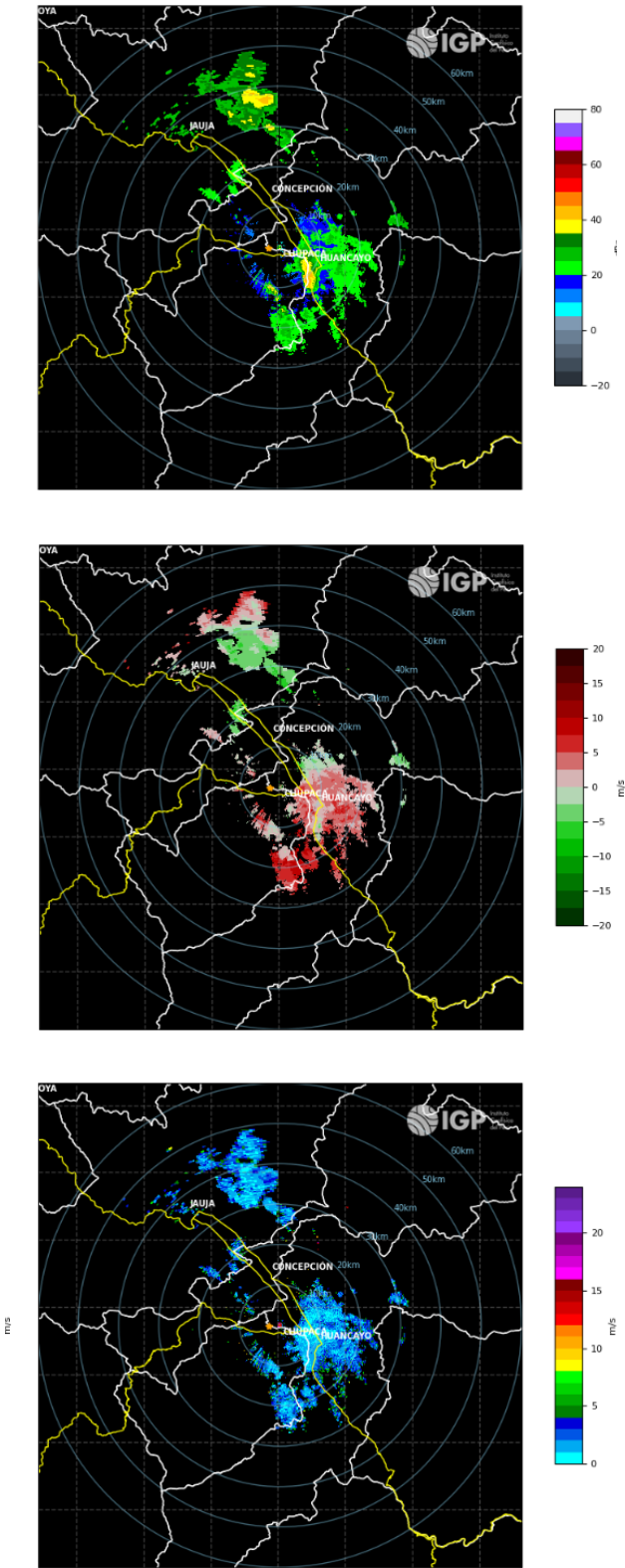


Figura 4. Resultados de momentos espectrales en 2025-11-09T21-17-59 con una elevación de 4,2°. Los paneles muestran reflectividad en dBZ (arriba), velocidad Doppler en m/s (centro) y ancho espectral en m/s (abajo).

En la Figura 4 se muestra un aumento de la velocidad máxima no ambigua, que alcanza ahora $\pm$ 20 m/s. Además, se observa una atenuación más pronunciada del rango ciego, lo que permitiría detectar ecos cercanos al radar.

4. Conclusiones

El desarrollo de formas de onda chirp aplicadas al sistema de radar SOPHY busca mejorar sus capacidades de detección. De los resultados obtenidos, se logró alcanzar un duty cycle máximo de 12 % para el pulso de transmisión. En consecuencia, se observó una mejora en la sensibilidad del radar, reflejada en un aumento de la SNR de 13.87 dB aproximadamente, así como en la atenuación del rango ciego y aumento de la velocidad máxima no ambigua del radar, que permite ahora detectar ecos de ± 20 m/s. Estas mejoras podrían contribuir a los estudios realizados por la DCAHCC para el monitoreo y estudios de fenómenos atmosféricos. Por otro lado, la aplicación de nuevas formas de onda y técnicas de atenuación de rango ciego sigue siendo objeto de estudio para futuras aplicaciones en el radar meteorológico SOPHY.

5. Agradecimientos

Este estudio fue desarrollado en el marco del proyecto "Aplicaciones del radar meteorológico SOPHY para la gestión del riesgo de desastres y los recursos hídricos en el Perú: caso El Niño en Piura", subvencionado por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), a través del programa PROCIENCIA, en el marco del concurso E041-2023-04: Proyectos de Investigación Científica AECID para reducir la vulnerabilidad ante los efectos de la crisis climática, alimentaria y/o sanitaria en el Perú desde los Institutos Públicos de Investigación (IPI), según el Contrato N.º PE501087421-2024, en el marco del Acuerdo de Concesión de Subvención Exp. N.º 021/SPE/0000400012 con la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID).

6. Referencias

Venkatesh, V., Palreddy, S., Hopf, A. P., Hardwick, K., Tsai, P.-S., Frasier, S. J., Bluestein, H., Hauser, J., French, M., Snyder, J., & Tanamachi, R. (2008). The UMass X-Pol mobile Doppler radar: Description, recent observations, and new system developments. *IGARSS 2008 – 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, V-101–V-104. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4780037>

Cheong, B. L., Kelley, R., Palmer, R. D., Zhang, Y., Yeary, M., & Yu, T. Y. (2013). PX-1000: A solid-state polarimetric X-band weather radar and time-frequency multiplexed waveform for blind range mitigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(11), 3064–3072. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2270046>

Neely R. R., III, Bennett, L., Blyth, A., Collier, C., Dufton, D., Groves, J., Walker, D., Walden, C., Bradford, J., Brooks, B., Addison, F. I., Nicol, J., & Pickering, B. (2018). The NCAS mobile dual-polarisation Doppler X-band weather radar (NXPol). *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(12), 6481–6494. <https://doi.org/10.5194/amt-11-6481-2018>

Espinoza, J.-C., Scipión, D., Valdez, A., & Verástegui, J. (2021). SOPHY: Scanning-system for observations of Peruvian hydrometeorological-events. *2021 IEEE International Conference on Aerospace and Signal Processing (INCAS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/INCAS53599.2021.9666928>

Ózdemir, C. (2012). *Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118178072>

Das, S., & Jena, S. (2013). *Radar pulse compression using frequency modulated signal* [Tesis de licenciatura, National Institute of Technology Rourkela]. EThesis @ NIT Rourkela. <http://ethesis.nitrkl.ac.in/5342/>

Qiu, X., Ding, C., & Hu, D. (2013). *Bistatic SAR data processing algorithms*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Bistatic+SAR+Data+Processing+Algorithms-p-9781118188118>

RESUMEN INFORME TÉCNICO

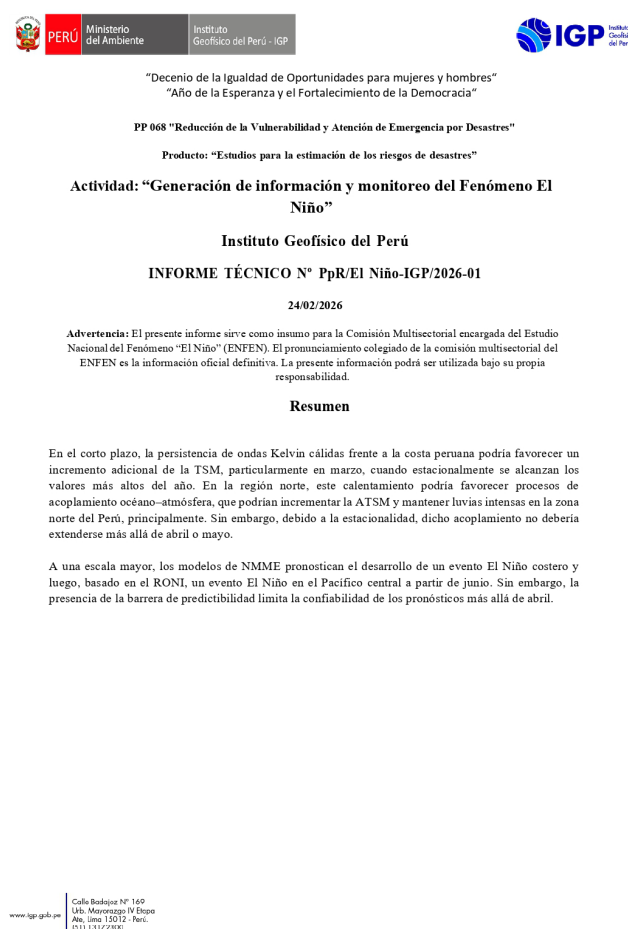
n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2026-01

Publicado el 24 de febrero del 2026

En el corto plazo, la persistencia de ondas Kelvin cálidas frente a la costa peruana podría favorecer un incremento adicional de la TSM, particularmente en marzo, cuando estacionalmente se alcanzan los valores más altos del año. En la región norte, este calentamiento podría favorecer procesos de acoplamiento océano-atmósfera, que podrían incrementar la ATSM y mantener lluvias intensas en la zona norte del Perú, principalmente. Sin embargo, debido a la estacionalidad, dicho acoplamiento no debería extenderse más allá de abril o mayo.

A una escala mayor, los modelos del NMME pronostican el desarrollo de un evento El Niño Costero y luego, basado en el RONI, un evento El Niño en el Pacífico-central a partir de junio. Sin embargo, la presencia de la barrera de predictibilidad limita la confiabilidad de los pronósticos más allá de abril.

El informe técnico completo se encuentra disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5812>



Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

COMUNICADO OFICIAL

EFEN n.º 02 – 2026



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO" – ENFEN
Decreto Supremo n.º 007-2017-PRODUCE

Estado del sistema de alerta: **Vigilancia de El Niño Costero¹**

Publicado el 30 de enero de 2026

La Comisión Multisectorial del ENFEN, en base al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas hasta la fecha, así como de los pronósticos de los modelos climáticos nacionales e internacionales actualizados, considera que, las condiciones cálidas débiles son más probables a partir de marzo de 2026, persistiendo al menos hasta octubre de 2026, lo cual configura el posible desarrollo de un evento El Niño Costero de magnitud débil, por lo pronto. En ese contexto, la comisión ENFEN mantiene el Estado del Sistema de Alerta ante El Niño Costero/La Niña Costera en "Vigilancia de El Niño Costero".

Por otro lado, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1), la condición neutra es más probable que continúe hasta mayo de 2026 (Figura 2). A partir de junio, y al menos hasta octubre de 2026, las condiciones cálidas débiles serían las más probables, configurando el posible desarrollo de El Niño en el Pacífico central.

Para el trimestre febrero – abril 2026, se esperan en promedio, precipitaciones entre normal a sobre lo normal en la costa norte; especialmente durante marzo y abril, donde no se descartan episodios de lluvias de moderada a fuerte intensidad, así como temperaturas del aire por encima de los rangos normales. En cuanto al pronóstico hidrológico, se prevé que predominen caudales en el rango normal a sobre lo normal, destacando esta última condición para los ríos Tumbes y Chira, en abril.

En cuanto a los recursos pesqueros, se prevé que, para las próximas semanas, los indicadores reproductivos de la anchoveta muestren el incremento de sus procesos de maduración gonadal, de acuerdo con lo esperado para la época.

Respecto a los recursos transzonales, se espera que continúe la disponibilidad de jurel principalmente en la región sur y de bonito dentro de las 60 millas náuticas

¹ Vigilancia de El Niño Costero: De acuerdo con el análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas y de la predicción de los modelos climáticos, el pronóstico probabilístico mensual del ICEN indica que la probabilidad de la categoría de las condiciones cálidas superará el 50 % durante al menos tres meses consecutivos, por lo cual El Niño Costero podría desarrollarse. Al inicio del texto del CO se indicará una magnitud tentativa del posible evento y los meses en los que podría presentarse (Nota Técnica ENFEN 02-2026; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-02-2026-sistema-dealerta-ante-el-nino-y-la-nina-costera/>)

² Condición de "cálida débil" es cuando el ICEN es mayor que +0.5 y menor o igual que +1.3. (Nota Técnica ENFEN 01-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-nina-costera-en-elperu/?wpdmdl=1905&refresh=691b0d3c0f0f51763380540>).

³ Las condiciones mensuales se establecen en base al valor del ICEN. En el caso de la condición neutra, esta corresponde cuando el valor del ICEN es mayor o igual que -0.7 y menor o igual que +0.5 (Nota Técnica ENFEN 01-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-01-2024-definicionoperacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-nina-costera-en-elperu/>). Para el caso del Pacífico central, la condición neutra se considera cuando el valor del ONI es mayor que -0.5 y menor que +0.5 (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

de costa. En cuanto al perico se espera una ampliación de su distribución frente al litoral peruano acorde con su estacionalidad.

Se recomienda a los tomadores de decisiones adoptar medidas correspondientes a la prevención, preparación y reducción del riesgo de desastres. Asimismo, se sugiere dar seguimiento constante a los avisos meteorológicos y pronósticos estacionales, para las acciones correspondientes. Por otro lado, se exhorta a la población a mantenerse informada a través de las fuentes oficiales del ENFEN.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará monitoreando la evolución de las condiciones oceánicas, atmosféricas y biológicas-pesqueras, y actualizando las perspectivas. La emisión del próximo Comunicado Oficial ordinario será el viernes 13 de febrero de 2026.

Para más información, consultar el Informe Técnico en el siguiente enlace:

<https://enfen.imarpe.gob.pe/download/comunicado-oficial-enfen-n-02-2026/>

<https://enfen.imarpe.gob.pe/download/informe-tecnico-enfen-ano-11-n14-al-16-de-diciembrede-2025/>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



IMARPE
INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ



INDECI
INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL



⁴ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-68.pdf>

⁵ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-65.pdf>



@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru