

Evaluación del posible impacto de la variabilidad y cambio climático en el nivel del mar en la costa de Lima

Takahashi, K¹, Mosquera, K., Aparco, J., Ramos, Y., Fajardo, J., Montes, I.
Instituto Geofísico del Perú

1. Introducción.

El nivel del mar es dinámico. Factores con diversos orígenes pueden afectarlo y producir impactos en las infraestructuras costeras. Este estudio se enfoca en cuantificar aproximadamente las contribuciones al nivel del mar de procesos asociados a la variabilidad y cambio climático en diversas escalas temporales en la costa limeña. En particular, este estudio se concentra en los siguientes fenómenos:

- a. El Niño y ondas Kelvin
- b. Variabilidad climática decadal natural
- c. Cambio climático futuro producido por gases invernadero

Como caracterización de las condiciones normales se incluye un análisis de las mareas y el ciclo estacional del nivel del mar.

Procesos de corto periodo, como tsunamis y oleajes no son tema del presente estudio. Asimismo, no se consideran los cambios asociados a procesos de origen tectónico como sismos o subducción de placas.

2. Metodología.

El presente estudio se basa en la síntesis de resultados científicos publicados en revistas internacionales arbitradas, en el análisis de datos de nivel del mar y la propuesta de escenarios extremos referenciales basados en la información anterior y en algunos supuestos.

La caracterización de las variaciones en nivel del mar asociada a las mareas, la estacionalidad y El Niño se basa en los datos diarios y horarios de la estación mareográfica de Callao(12.07°S,77.17°W) obtenidos de la página web: <http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/download/rq>, perteneciente a la Universidad de Hawaii Sea Level Center (UHSLC) y el World Data Center-A para la Oceanografía. Esta serie presenta una discontinuidad alrededor del año 1975, luego una tendencia lineal de -2.7 ± 0.2 mm/año hasta alrededor del año 2007, y luego un aparente quiebre en la tendencia. Para contar con una serie homogénea para estimar las variaciones asociadas a las mareas, estacionalidad y El Niño, se optó por trabajar con la serie solo para el periodo 1976-2006, a la cual se le removió el promedio y la tendencia lineal. La serie de anomalía de nivel del mar horaria

¹ ken.takahashi@igp.gob.pe

resultante se presenta en la Fig. 1. La estimación de las componentes de la marea se realizó utilizando el programa T_TIDE (Pawlowicz et al., 2002) con los datos horarios, mientras que la variación estacional se realizó mediante un análisis armónico considerando los primeros cinco armónicos del ciclo anual de los datos diarios. Asimismo, se trabajó con el promedio mensual de estos datos.

Adicionalmente, para evaluar los efectos regionales del cambio climático se analizaron datos mensuales de nivel del mar (variable zos) del primer miembro de cada *ensemble* de modelos de la base de datos CMIP5 bajo el escenario RCP4.5 (un escenario intermedio de emisiones de gases invernadero). Los datos se obtuvieron del portal web de ESGF (pcmdi9.llnl.gov). Para el análisis se utilizó el software GrADS, por lo cual se consideraron solo modelos con la grilla regular, con cerca de cien años de datos, y cuya variable zos incluye el valor global del nivel del mar. Según la disponibilidad de datos, se consideraron los siguientes modelos: bcc-csm1-1-m, bcc-csm1-1, GISS-E2-R-CC, HadGEM2-ES, MIROC-ESM, y MIROC-ESM-CHEM.

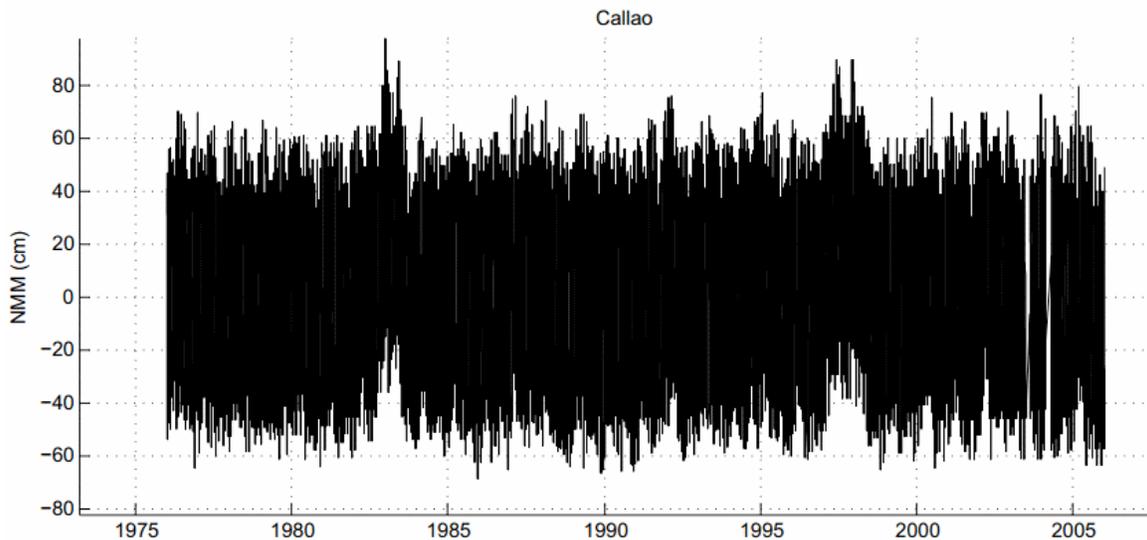


Figura 1: Serie de anomalías horaria de nivel del mar (cm) en el Callao, a la cual se le ha removido el promedio y la tendencia lineal.

3. Mareas y ciclo estacional

La variabilidad del nivel del mar asociada a las mareas (Fig. 2) presenta dos ciclos de marea por día (componentes semidiurnas) pero donde típicamente una tiene mayor amplitud que la otra (componente diurna). Además, asociado al ciclo lunar se observan periodos de gran amplitud correspondiente a la sicigia (cerca a cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados) y de mínima amplitud durante la cuadratura (cerca a cuando el Sol, la Luna y la Tierra forman un ángulo recto). El ciclo de sicigia-cuadratura dura aproximadamente dos semanas. Según DHN (2012), en el Callao la amplitud media sería de 54 cm en el año 2013, mientras que la amplitud de la sicigia sería de 97 cm. Además indican que la pleamar máxima del año sería 44 cm por encima del promedio de pleamares, mientras que la bajamar promedio sería 37 cm por debajo del promedio de bajamares.

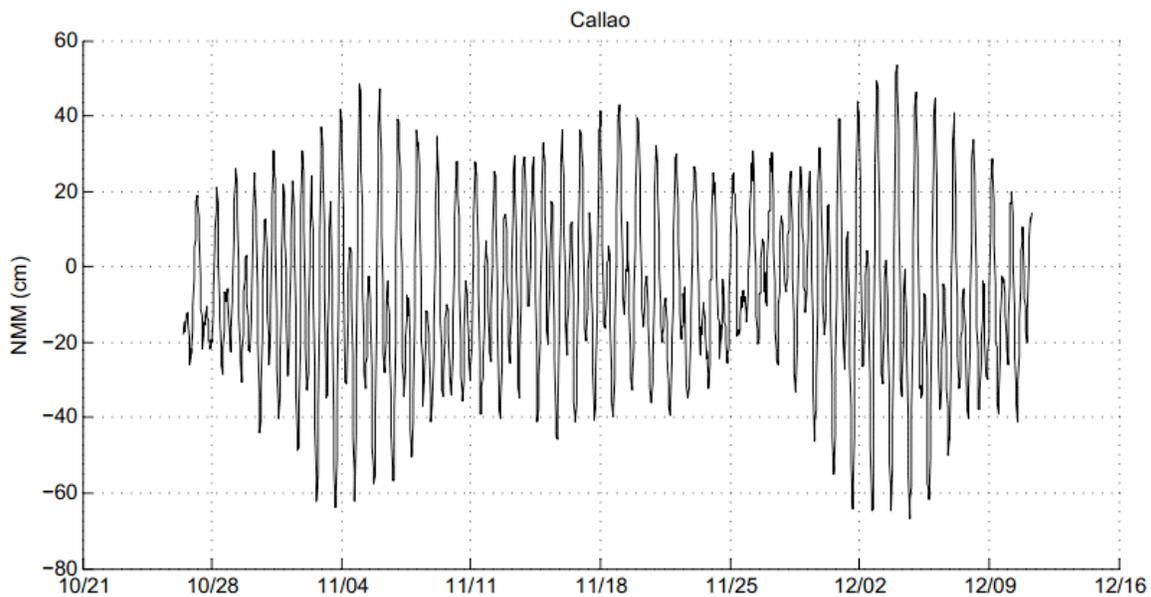


Figura 2: Nivel del mar horario medido en Callao entre octubre y diciembre de 1990, evidenciando los periodos de sicigia y cuadratura. (Elaboración propia)

Por medio del análisis armónico, se pudo calcular las amplitudes de las principales componentes de la marea (Fig. 3), la cual como se anticipó está dominada por la componente lunar semidiurna (M_2). El ratio F entre las principales componentes diurnas y semidiurnas se calculó como:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} = 0.7$$

El valor de $F=0.7$ corresponde a una marea de tipo mixto con predominio semidiurno ($0.25 < F < 1.5$), consistente con lo indicado por DHN (2012).

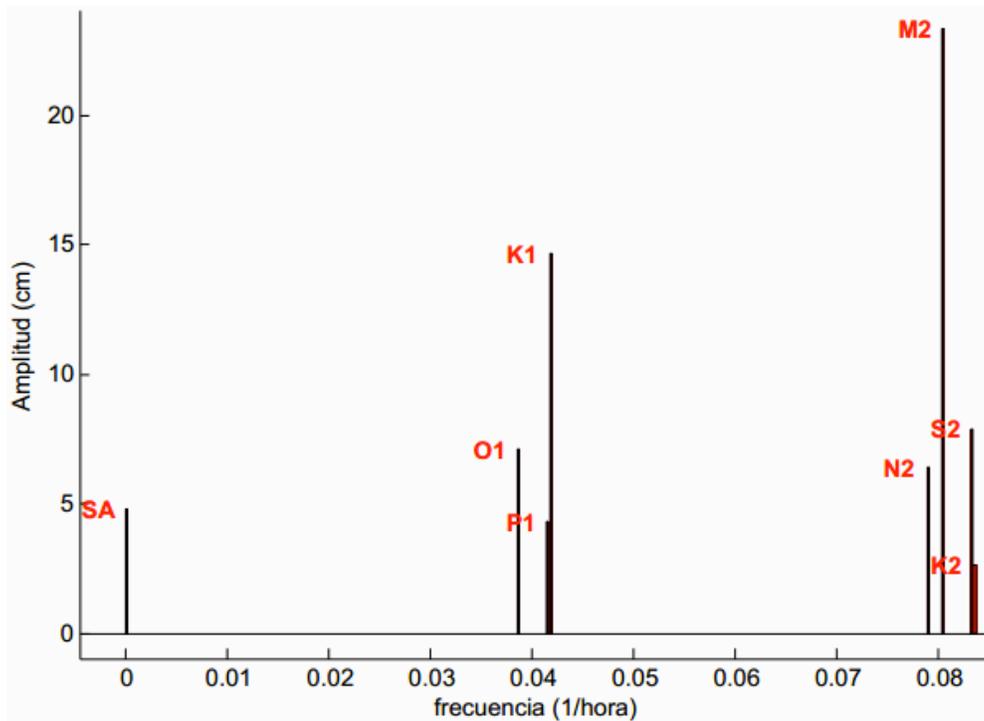


Figura 3: Espectro de la amplitud de las principales componentes de marea semidiurna (M2, S2, N2, K2), marea diurna (K1, O1, P1) y la variación anual (SA) de los datos de Callao calculado usando T_TIDE. (Elaboración propia)

Se estima que el ciclo estacional para el periodo 1976-2006 estimado con cinco armónicos del periodo anual (Fig. 4) tuvo un rango de 8.6 cm, dominado por la componente anual (rango=8.0 cm), seguida por la cuatrimestral (1.0 cm), la semianual (0.6 cm), trimestral (0.4 cm) y bimestral (0.2 cm). Los valores máximos se encuentran en marzo-abril y los mínimos alrededor de agosto-setiembre. La componente anual está aproximadamente en fase con la del contenido de calor oceánico (Takahashi, 2007) pero en cuadratura con el perihelio/afelio, por lo que se deduce que el ciclo anual en nivel del mar está dominado por la componente climatológica. Se nota que una estimación del ciclo estacional para el periodo más reciente (2006-2012, no mostrado) sugiere un retraso en este ciclo de dos meses en el pico máximo y un mes en el mínimo, así como un aumento en el rango de unos 14 cm. Sin embargo, debido a lo corto de la serie para este periodo no es claro si esto representa un cambio real en la estacionalidad, lo cual requiere una investigación más profunda.

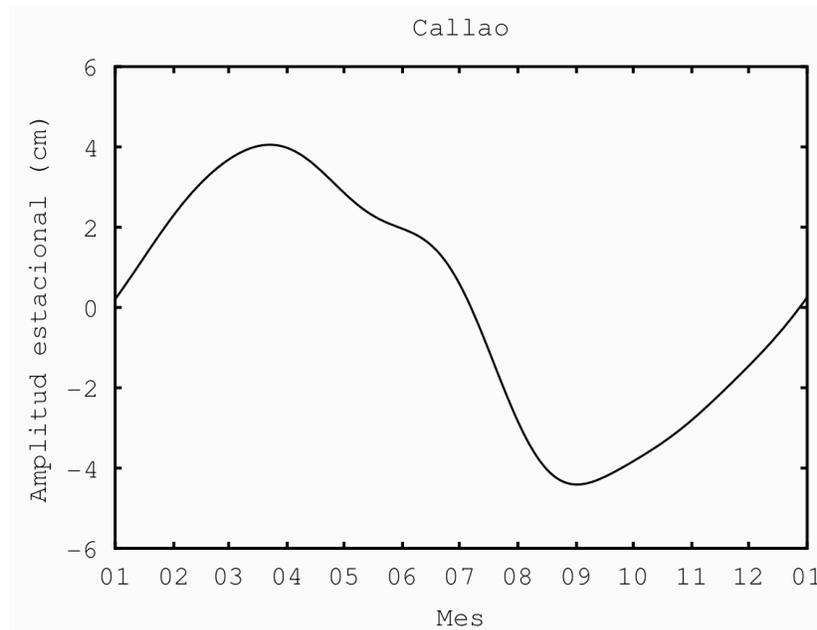


Figura 4: Ciclo estacional del nivel del mar en Callao (cm) estimada usando cinco armónicos del periodo anual (1976-2006). El eje horizontal inicia y termina en el 1ro de enero. (Elaboración propia)

4. El Niño y ondas Kelvin

El Fenómeno El Niño se caracteriza por un calentamiento anómalo de la costa peruana. Sin embargo, este calentamiento se genera típicamente mediante ondas Kelvin que provienen del Pacífico ecuatorial forzadas por vientos ecuatoriales que soplan anómalamente del oeste y que producen un aumento anormal de nivel del mar en la costa (Fig. 5). En la Fig. 6 se puede apreciar una simulación de cómo una onda Kelvin hipotética incide en la costa y produce dicho aumento de nivel del mar. Las ondas Kelvin se observan típicamente en escalas de semanas a meses.

La serie de nivel del mar mensual (Fig. 7) permite apreciar tanto el ciclo estacional como los aumentos de nivel asociados a los eventos El Niño, pudiendo ser estos últimos bastante mayores que el anterior. En particular, los eventos extraordinarios de 1982-83 y 1997-98 (Takahashi et al., 2011) tuvieron anomalías máximas de 29 y 33 cm, respectivamente, tras remover el ciclo estacional. Otras anomalías notables fueron de 13 cm tanto en febrero 1992 y marzo de 2002, correspondientes a eventos El Niño moderado y débil, respectivamente, en la costa (ENFEN, 2012).

A escala diaria (Fig. 8), durante los cuatro años de los eventos eventos extraordinarios (1982, 1983, 1997, 1998), las anomalías del 10% de los días excedieron 27 cm, alcanzando un valor máximo de **51 cm** en enero de 1983.

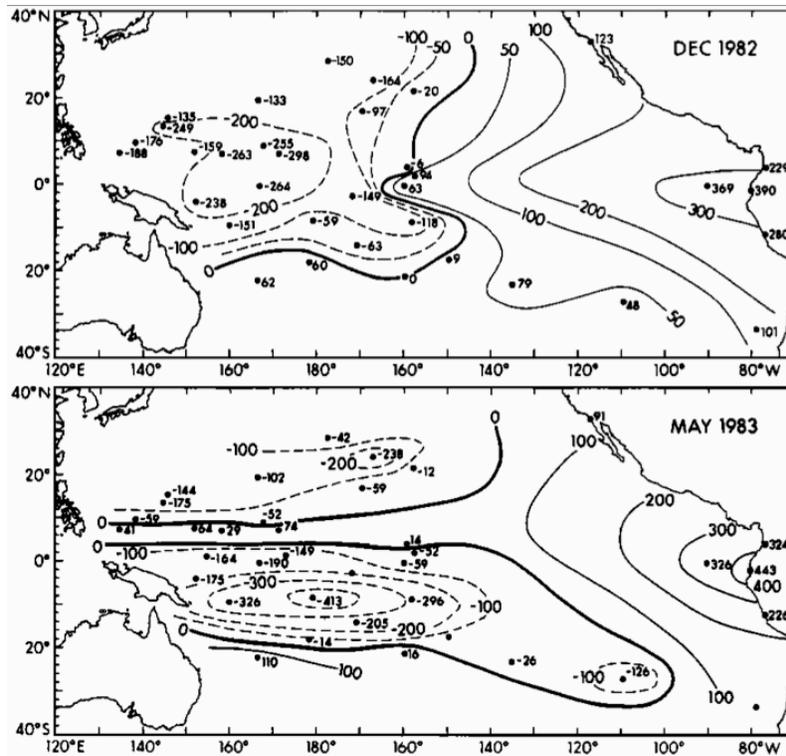


Figura 5: Anomalías mensuales de nivel del mar (mm) durante El Niño 1982-1983 (Fuente: Wyrтки, 1985)

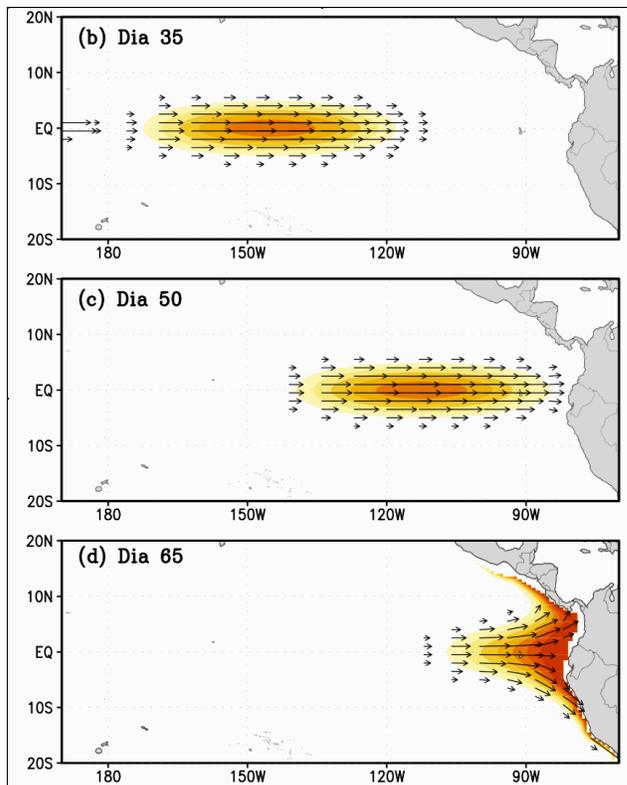


Figura 6: Simulación con el modelo LOM-IGP de la propagación de una onda de Kelvin ecuatorial cálida hipotética. En colores se muestran las anomalías de nivel del mar positivas. En cada panel se indica el número de días después del pico máximo del forzamiento de viento en el Pacífico occidental. (Fuente: Mosquera, 2014)

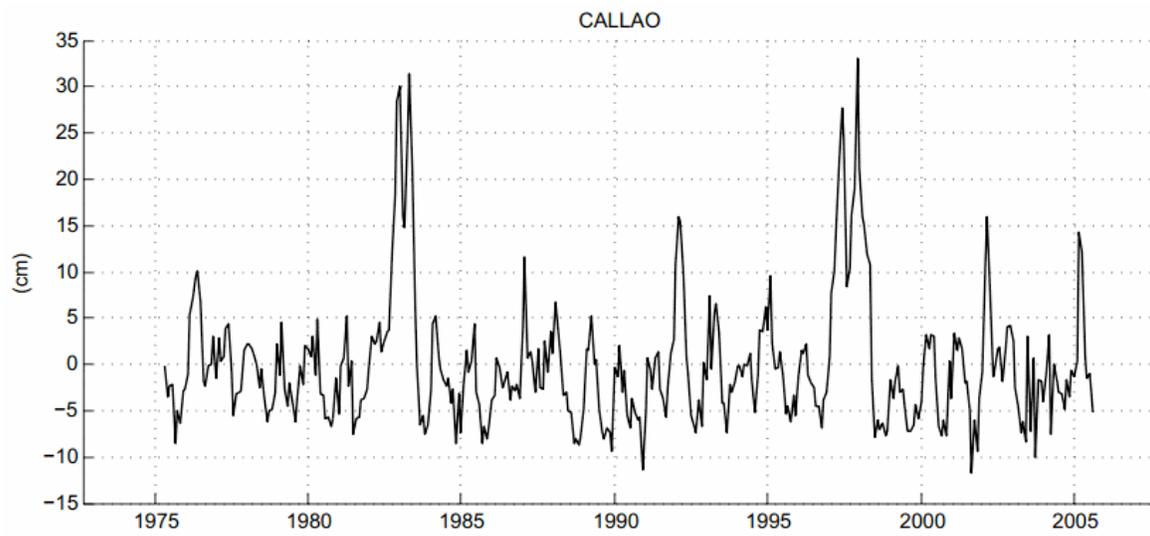


Figura 7: Anomalías mensuales de nivel del mar (cm) en el Callao. (Elaboración propia)

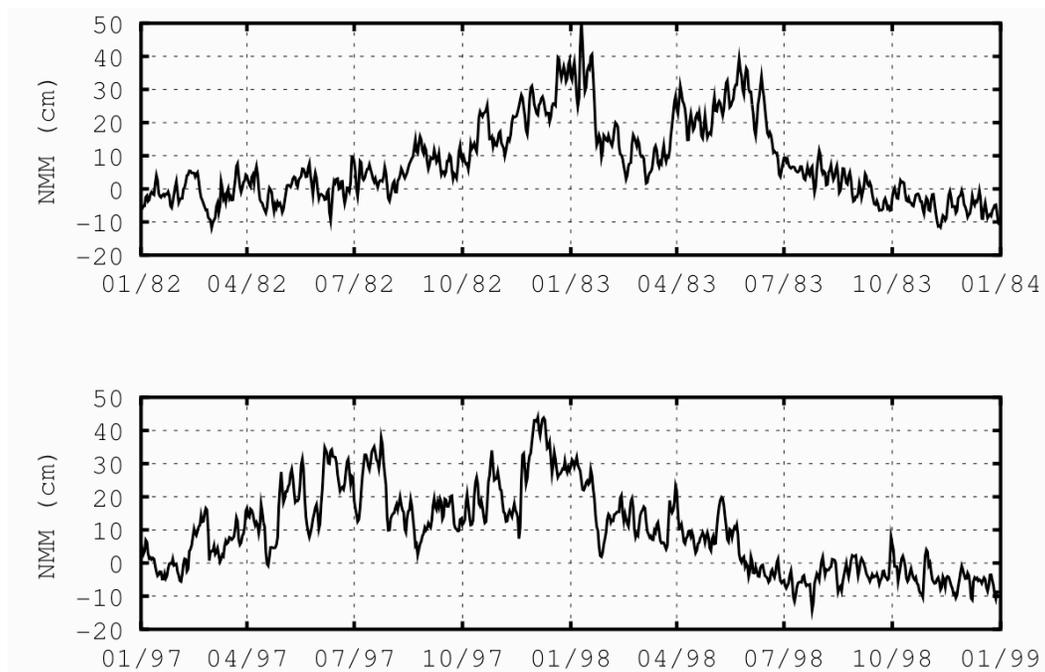


Figura 8: Anomalías diarias de nivel del mar (cm) en el Callao durante El Niño 1982-83 (arriba) y 1997-98 (abajo). (Elaboración propia)

4. Cambio climático global

La emisión de gases de efecto invernadero por la humanidad tienen el efecto de calentar el planeta mediante la alteración del balance de energía global. Entre otros efectos, la expansión térmica del agua del mar y el derretimiento del hielo continental producen el aumento del nivel del mar global.

En el reporte más reciente del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC en inglés), Church et al. (2013) sintetizan el nivel del conocimiento científico sobre el efecto del cambio climático en el nivel del mar. En relación al aumento del nivel del mar global observado (Fig.9) indica, que:

- Entre los años 1901 y 2010, la tasa de aumento fue de 1.7 ± 0.2 mm/año
- Entre los años 1993 y 2010, la tasa de aumento fue de 3.2 ± 0.4 mm/año

Las proyecciones del cambio climático futuro, incluyendo los efectos en el nivel del mar, se basan en modelos de la física del clima bajo escenarios de emisiones de gases invernadero. A nivel internacional, las simulaciones con dichos modelos se coordinaron en el marco de CMIP5, dentro del cual se establecieron los escenarios RCPxxx donde xxx corresponde al forzante radiativo en Wm^{-2} asociado a los gases invernaderos (a mayor forzante, mayor calentamiento). De esta manera, el aumento en el nivel medio del mar global proyectado entre los periodos 1986-2005 y 2045-2065 considera un valor probable de hasta 38 cm para el escenario de emisiones pesimista RCP8.5 (IPCC, 2013; Fig. 10). Ajustando para un año base de 2014 usando la tendencia reciente observada de 3.2 mm/año, se obtiene un aumento extremo entre el presente y el año 2050 de **28 cm**.

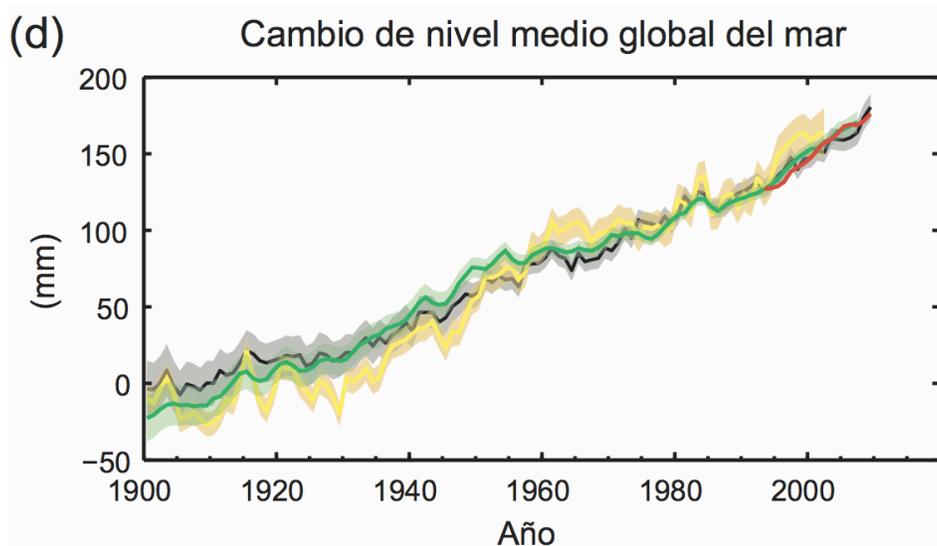


Figura 9: Nivel medio global del mar con respecto al promedio del conjunto de datos de más larga duración entre 1900 y 1905, y con todos los conjuntos de datos alineados para tener el mismo valor en 1993, primer año de datos de altimetría por satélite. (Fuente: IPCC, 2013)

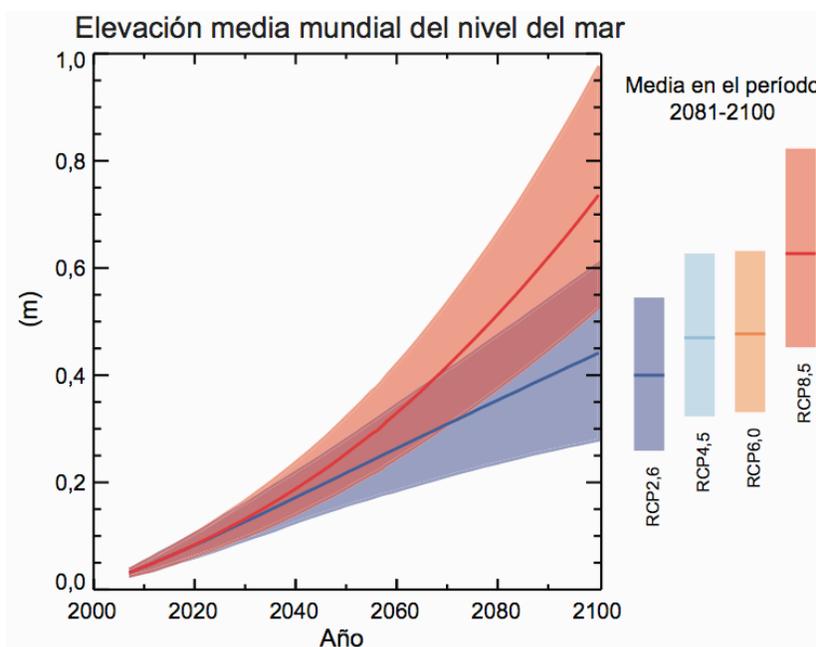


Figura 10: Proyecciones de la elevación media mundial del nivel del mar durante el siglo XXI, en relación con el período 1986-2005, a partir de una combinación del conjunto de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) y de los modelos basados en procesos para los escenarios RCP2,6 y RCP8,5. El rango probable resultante de la evaluación se indica con una banda sombreada. Los rangos probables resultantes de la evaluación para la media, registrada durante el período 2081-2100 para todos los escenarios de RCP, se muestran con barras verticales de colores, y el valor de la mediana correspondiente se indica con una línea horizontal. (Fuente: IPCC, 2013)

5. Variabilidad decadal natural

Además de El Niño, existe un patrón de variabilidad climática de características similares pero a una escala de tiempo multi-decadal en lugar de interanual. Existen diferentes nombres e índices para su caracterización y uno de los más usados es el índice de la "Oscilación Decadal del Pacífico" (PDO en inglés). En la Fig. 11 se presentan los patrones de anomalías en temperatura superficial del mar y vientos asociados a las fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) del PDO, que se caracterizan por mayores y menores temperaturas frente al Perú, respectivamente. La serie de tiempo del PDO (Fig. 12) presenta una variabilidad lenta, con fases positivas y negativas de algunas décadas cada una: 1944-1976 (negativa; Deser et al., 2004), 1977-1999 (positiva; Chavez et al., 2003), y 2000-presente (negativa). Es importante contar con datos de largo plazo para poder separar la variabilidad decadal natural del cambio climático. Esto se aprecia claramente cuando se considera la tendencia lineal para el periodo 1993-presente que corresponde a la disponibilidad de altimetría satelital para medir el nivel del mar. Claramente, en ese periodo la serie del PDO (Fig. 12) tendría una tendencia negativa, que se podría confundir con cambio climático.

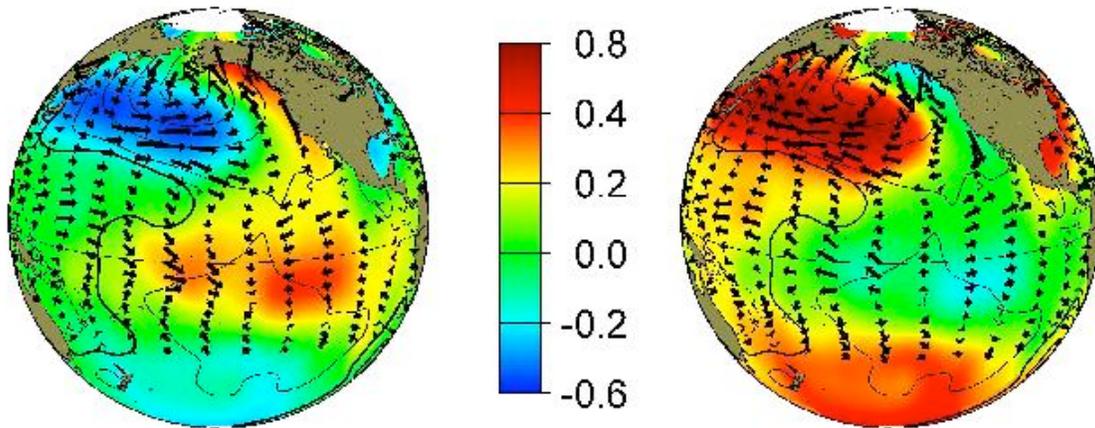


Figura 11: Patrones de anomalías en temperatura superficial del mar y vientos asociados a las fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) de la "Oscilación Decadal del Pacífico" (Fuente: <http://jisao.washington.edu/pdo/>)

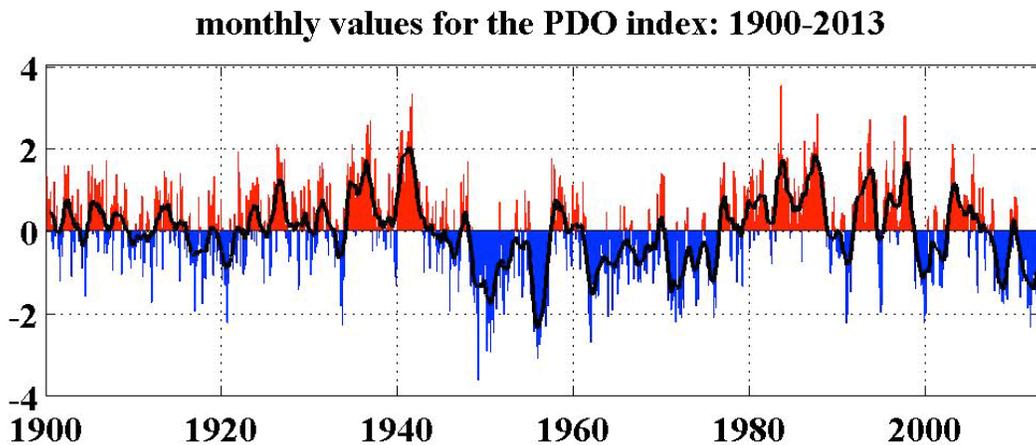


Figura 12. Índice mensual de la "Oscilación Decadal del Pacífico" (Fuente: <http://jisao.washington.edu/pdo/>)

Dicha tendencia se aprecia también en el nivel del mar. Frente a la costa de Lima, los datos de altimetría satelital (Figs. 13 y 14) indica una tendencia lineal en el nivel del mar de aproximadamente 2 mm/año frente a Lima para el periodo 1993-2008, lo cual es consistente con la tendencia lineal de -2.7 ± 0.2 mm/año observada en los datos de Callao para el periodo 1976-2006. Restando la contribución del aumento global de 3.2 mm/año, esto implica un efecto de reducción del nivel del mar de hasta -6 mm/año, que es atribuido a la variabilidad natural interdecadal de los vientos alisios (Fig. 14; Timmermann et al., 2010; Merrifield y Maltrud, 2011). De durar la actual fase negativa como las anteriores (23 a 33 años), la próxima transición a la fase cálida sería alrededor de los años 2022 o 2032. El año 2050

entonces correspondería aproximadamente a la próxima fase cálida y podríamos hacer un estimado de cuánto esto aumentaría el nivel del mar frente a Lima tomando la tendencia lineal opuesta como **+6 mm/año** entre ahora y el futuro hasta el 2050.

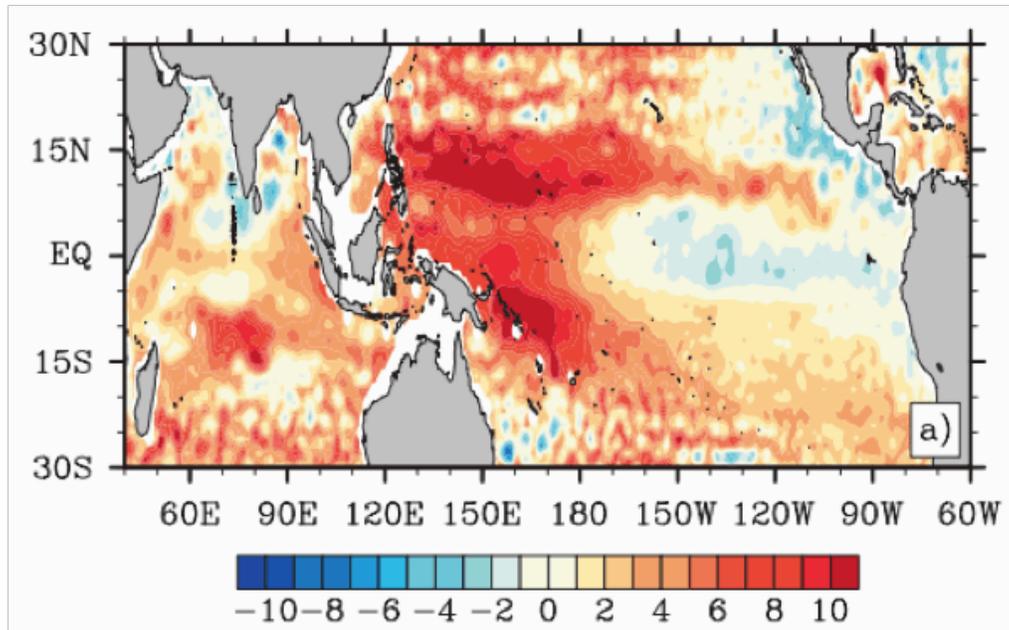


Figura 13. Tendencia lineal en nivel del mar (mm/año) para el periodo 1993-2008 de datos de altimetría satelital (Fuente: Timmermann et al., 2010).

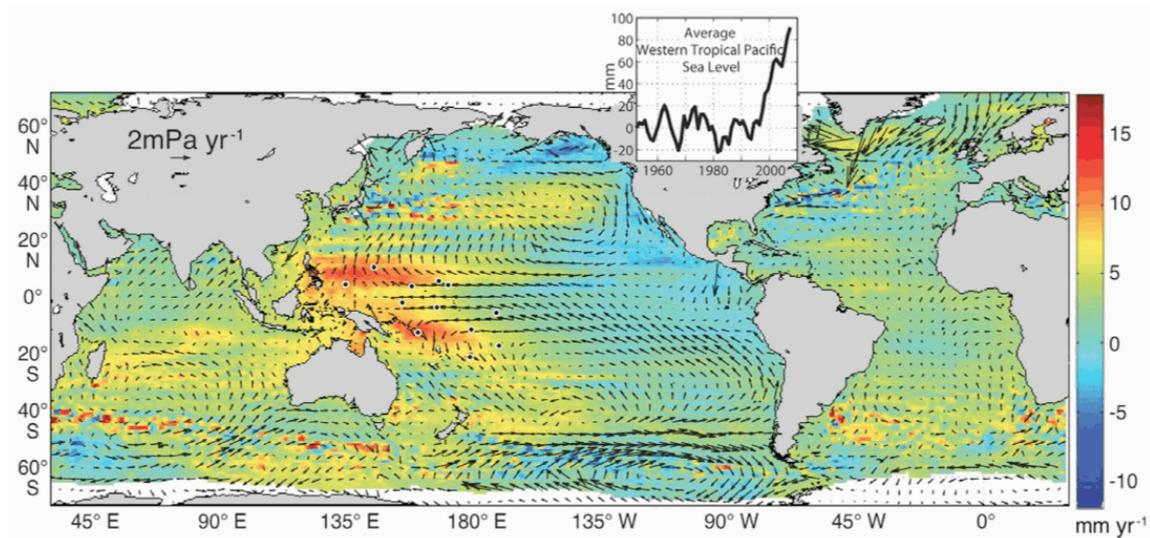


Figura 14. Tendencia lineal en nivel del mar (mm/año) para el periodo 1993-2010 de nivel del mar de altimetría satelital y esfuerzos de viento de ECMWF (Fuente: Merrifield y Maltrud, 2011).

6. Efectos regionales del cambio climático

Si bien el nivel del mar global se espera que aumente por la expansión térmica y el derretimiento del hielo continental, también se espera que los cambios en los vientos asociados al cambio climático futuro tengan un efecto en la redistribución de las masas de agua, pudiendo resultar en cambios locales en el nivel del mar distinto del global (Church et al., 2013; Fig. 15). En particular, se espera un debilitamiento de los vientos alisios ecuatoriales que tendría un efecto cualitativamente similar a El Niño (Vecchi y Soden, 2007), lo cual implicaría un aumento adicional en el nivel del mar frente al Perú. Adicionalmente, el aumento de los vientos antárticos aumentarían la cantidad de agua en la región tropical (ej. Church et al., 2013). Ambos efectos podrían producir un aumento adicional en el nivel del mar frente a Lima.

En los seis modelos de CMIP5 considerados, el adicional en el aumento del nivel del mar frente a Lima relativo al aumento global está entre -2% y +180%. Los valores generalmente positivos son consistentes con los mecanismos descritos arriba. Los resultados para cada modelo se muestran en la tabla siguiente:

Modelo climático	Aumento adicional regional de nivel del mar (frente a Lima con respecto al aumento global)
bcc-csm1-1-m	-1%
bcc-csm1-1	+96%
GISS-E2-R-CC	+42%
HadGEM2-ES	-2%
MIROC-ESM	+180%
MIROC-ESM-CHEM	+145%

Claramente existe mucha dispersión entre los modelos y la incertidumbre es alta. Si tomamos 180% como un escenario extremo, si consideramos que el nivel del mar global aumenta en 28 cm entre ahora y el año 2050, entonces el aumento adicional sería de **50 cm**.

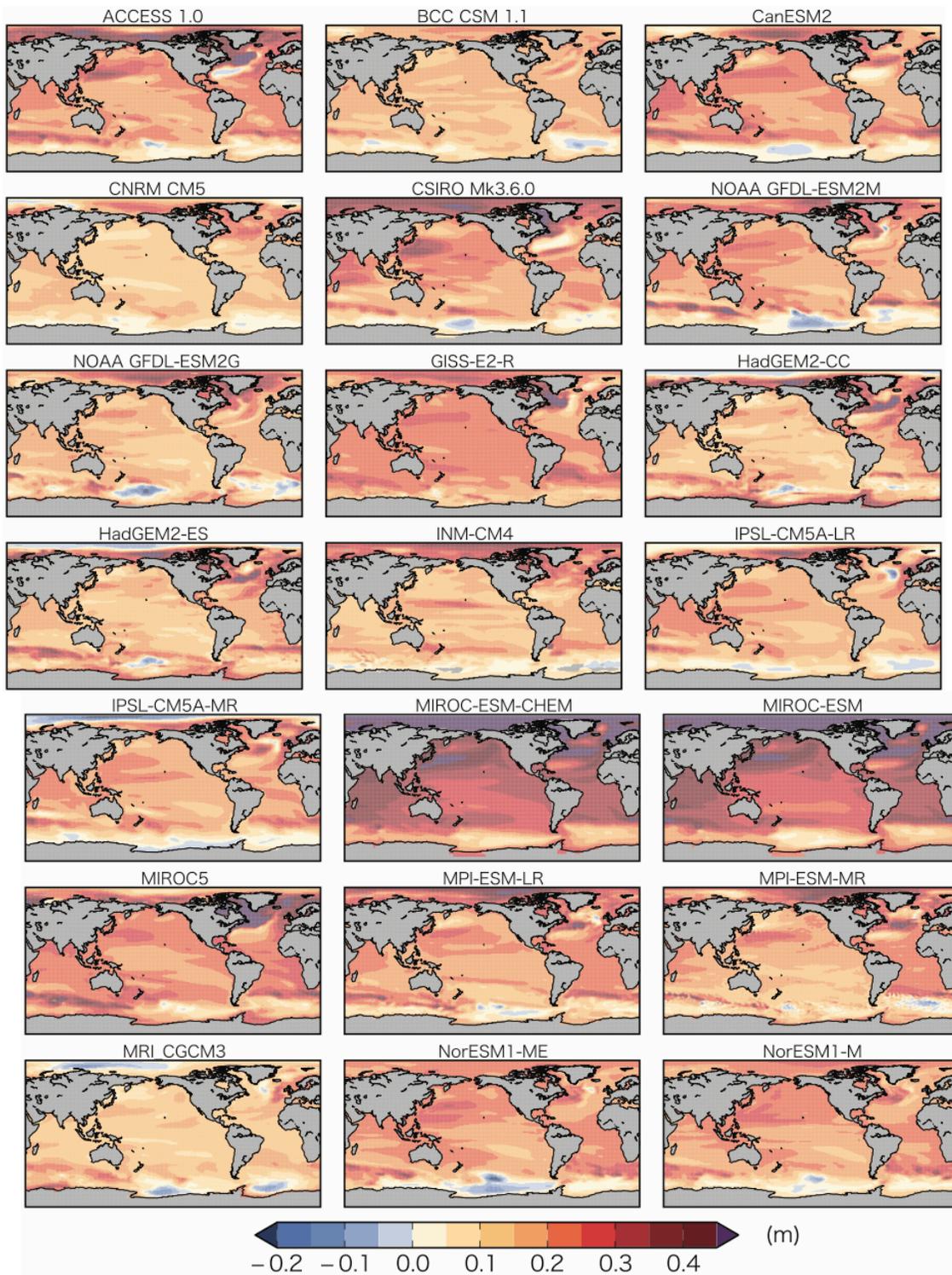


Figura 15 Cambio proyectado en nivel del mar (m) entre 1986-2005 a 2081-2100 por modelos climáticos de CMIP5 bajo el escenario RCP4.5 incluyendo efectos estéricos, dinámicos y glaciares. (Fuente: Church et al., 2013)

7. Escenarios extremos referenciales

Tomando los resultados descritos anteriormente, se plantean a continuación escenarios de aumento extremo de nivel del mar para las décadas alrededor de los años 2030 y 2050. Se asume que podría ocurrir un evento El Niño extraordinario en cualquier momento y que la variabilidad decadal tendrá un efecto contrario pero con la misma magnitud que la observada recientemente. Por otro lado, se ha considerado el escenario pesimista de cambio climático, tanto en el nivel del mar global como en la amplificación local frente a Lima. Sin embargo, es posible que la realidad exceda lo planteado y es necesario tomar estos escenarios como referencias posiblemente conservadoras.

Fenómeno climático	Escenario de aumento extremo en nivel del mar en algún momento de la década alrededor del año 2030 relativo al patrón del año 2014	
	Escala mensual	Escala diaria
El Niño y ondas Kelvin	33 cm	51 cm
Variabilidad decadal natural	9 cm	9 cm
Efecto global del cambio climático futuro	13 cm	13 cm
Efecto regional del cambio climático futuro	23 cm	23 cm
Total	78 cm	96 cm

Fenómeno climático	Escenario de aumento extremo en nivel del mar en algún momento de la década alrededor del año 2050 relativo al nivel patrón del año 2014	
	Escala mensual	Escala diaria
El Niño y ondas Kelvin	33 cm	51 cm
Variabilidad decadal natural	21 cm	21 cm
Efecto global del cambio climático futuro	28 cm	28 cm
Efecto regional del cambio climático futuro	50 cm	50 cm
Total	132 cm	150 cm

7. Referencias

- **Chavez, F. P., Ryan, J., Luch-Cota, S.E., Ñiquen, M., 2003:** From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific ocean, *Science* 299 (5604), 217-221
- **Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013:** Sea Level Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press.
- **Deser, C., Phillips, A. S., Hurrell, J. W., 2004:** Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and the north Pacific during Boreal Winter since 1900, *Journal of Climate*, 17, 3109-3124.
- **Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), 2012:** *Tabla de Mareas 2013*, Marina de Guerra del Perú, Hidronav 2023.
- **ENFEN, 2012:** Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa de Perú, Nota Técnica ENFEN.
- **IPCC, 2013:** Resumen para responsables de políticas. *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, [Stocker, T.F., et al. (eds.)], Cambridge University Press
- **Merrifield, M. A., y Maltrud, M. E., 2011:** Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification, *Geophysical Research Letters*, 38, 21, doi:10.1029/2011GL049576
- **Mosquera, K., 2014:** Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico, *Boletín Técnico IGP "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño" 1, 1, 4-7.*
- **Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, 2002,** Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geosciences* 28, 929-937
- **Takahashi, K., 2005:** The annual cycle of heat content in the Peru Current region, *Journal of Climate* 18, 4937-4954, doi:10.1175/JCLI3572.1
- **Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., Dewitte, B., 2011:** ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophysical Research Letters*, 38, L10707, doi:10.1029/2011GL047364.
- **Timmermann A, McGregor S, Jin FF, 2010:** Wind effects on past and future regional sea level trends in the southern Indo-Pacific, *Journal of Climate*, 23 (16) pp. 4449-4437, doi:10.1175/2010JCLI3519.1
- **Vecchi, G. A., y Soden, B. J., 2007:** Global warming and the weakening of the tropical circulation, *Journal of Climate* 20, 4316-4340, doi:10.1029/2007GL031460
- **Wyrтки, K., 1985:** Sea level fluctuations in the Pacific during the 1982-83 El Niño, *Geophysical Research Letters*, 12 (3),125-128