

Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur.

History and description of “El Niño, Southern Oscillation” phenomenon.

JENNY MATURANA

MÓNICA BELLO

MICHELLE MANLEY

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile

Departamento de Oceanografía

Errázuriz 254, Playa Ancha, Valparaíso.

RESUMEN

El Niño, Oscilación del Sur (ENOS), corresponde a un evento climático natural que se desarrolla en el océano Pacífico ecuatorial central, la fase cálida de ENOS conocida como El Niño se manifiesta, principalmente, por un aumento de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y una disminución de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico. Estas condiciones anómalas generan fuertes precipitaciones y cambios notables en el clima y las pesquerías, tanto en los países ribereños del Pacífico sudoriental, como en otras partes del mundo. La fase inversa o fría de ENOS, conocida como La Niña, se caracteriza por presentar TSM más frías que lo normal, intensificación de los vientos alisios en el este del océano Pacífico y períodos de sequía.

En Chile, la última fase cálida de ENOS El Niño de características considerables, se presentó en 1997-1998, y la fase fría La Niña se desarrolló inmediatamente después durante los años 1998-1999. Por su parte, El Niño fue uno de los más intensos de las últimas dos décadas, lo que provocó alteraciones en la

pesquería y severas inundaciones en la zona central de Chile.

En este artículo se presenta una descripción general del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur, en base a una acuciosa recopilación bibliográfica, destacándose cada uno de los factores atmosféricos y oceánicos que influyen en el desarrollo de una fase cálida El Niño o bien de una fase fría La Niña.

ABSTRACT

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is a natural climatic event that takes place in the central equatorial Pacific. During the warm phase of ENSO, known as El Niño, the sea surface temperature (SST) rises, and the easterly winds become weaker than average on the eastern side of the Pacific ocean. These anomalous conditions generate strong rainfalls and changes in the weather and fisheries in the countries near the South Eastern Pacific, as well as in other parts

Palabras claves: El Niño, La Niña, vientos alisios, presión atmosférica, precipitación, Temperatura Superficial del Mar, termoclina, nivel del mar, surgencia, ondas.

Key words: El Niño, La Niña, trade winds, atmospheric pressure, precipitation, Sea Surface Temperature, termocline, sea level, upwelling, waves.

of the world. The opposite phase or cold phase of ENSO is known as La Niña, and it is characterised by presenting colder SST's than normal, an intensification of the easterly winds on the eastern side of the Pacific ocean, and periods of droughts.

In Chile, the last strong warm El Niño ENSO phase took place during 1997-1998, and was followed immediately by a cold phase La Niña during 1998-1999. This El Niño event was one of the most intense in the last two decades, and it caused alterations in the fisheries and severe floods in the central part of Chile.

A general description of the El Niño-Southern Oscillation based on a profound bibliographic research is made in this article, illustrating the atmospheric and oceanic factors that influence the development of a El Niño warm phase or a La Niña cold phase.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diversas investigaciones oceanográficas y meteorológicas demuestran la existencia de eventos climáticos extremos de escala global asociados a interacciones inestables entre el océano y la atmósfera.

Uno de los eventos de interacción océano-atmósfera más importantes, que se desarrolla a escala interanual, se conoce en la comunidad científica con el nombre de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS, en español / ENSO, en inglés), o comúnmente, con el nombre de El Niño.

Actualmente, puede inferirse la ocurrencia de eventos ENOS desde hace varios milenios atrás, mucho antes de que se tuvieran registros escritos de ellos y cuando aún no recibían la denominación de El Niño. Esto último es debido a que el impacto causado por las lluvias e inundaciones ocurridas posiblemente durante los años de El Niño deja-

ron sus marcas en el ambiente natural, principalmente en Perú y en Ecuador (Glantz, 1996). Por ejemplo, a fines de la década de los setenta, William Quinn y sus colegas identificaron y categorizaron eventos de El Niño hacia atrás en la historia, hasta los comienzos del año 1500. Ellos reunieron información de la temperatura del océano y las precipitaciones desde una variedad de fuentes, incluyendo los diarios personales de viajeros de la región, registros de la minería del guano, registros de plantaciones en Indonesia, bitácoras de buques y evidencias físicas e históricas de las inundaciones y deslizamientos de tierra que se produjeron siglos atrás (Quinn *et al.*, 1987).

La versión más aceptada de la expresión El Niño, se refiere al hecho de que pescadores artesanales identificaron la ocurrencia estacional de agua inusualmente cálida en las costas del Perú. Esta agua más cálida solía aparecer alrededor de la festividad de la Navidad. Por este motivo, los pescadores decidieron referirse a este fenómeno denominándolo "la corriente de El Niño", haciendo referencia al recién nacido Niño Jesús.

Con el desarrollo de la industria pesquera peruana de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la década de los sesenta, el interés por el conocimiento del evento El Niño aumentó significativamente. Hoy en día se conoce que los pescadores peruanos denominaban "la corriente de El Niño", a una corriente estacional cálida que se desplaza de norte a sur a lo largo de la costa de Ecuador y Perú (Glantz, 1996; Voituriez & Jacques, 2000). Ésta se desarrolla todos los años a partir del mes de diciembre aproximadamente, enfrentando y desplazando a la conocida corriente fría de Humboldt o de Chile-Perú (Glantz, 1996).

El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), que se manifiesta principalmente a través de un calentamiento o enfriamiento anormal de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el

océano Pacífico ecuatorial central y oriental. Estas variaciones de la TSM alcanzan las costas norte y sur de América y traen consigo alteraciones significativas en los patrones climáticos, que se desarrollan incluso en algunas regiones muy apartadas del globo. Por su parte, el ciclo ENOS se desarrolla en forma aperiódica y en una escala de tiempo mayor que la corriente de El Niño, ya que su aparición se presenta a intervalos irregulares que oscilan aproximadamente entre los 3 y 7 años. Cabe señalar que, durante los años en los que se manifiesta la fase cálida del ciclo ENOS, se genera un fortalecimiento de “la corriente de El Niño”.

Ciertamente, hasta ahora no se conoce cuál es la causa que gatilla el comienzo de un ciclo ENOS. Sin embargo, las investigaciones han identificado los signos que preceden la aparición de uno de estos eventos en sus componentes oceánica y atmosférica.

Así, la componente oceánica del ciclo ENOS está caracterizada por la aparición de fuertes anomalías positivas (durante El Niño) o negativas (durante La Niña) de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) en regiones específicas de la cuenca del Pacífico tropical y costa sudamericana, las que se prolongan por varios meses consecutivos. Las anomalías positivas de TSM se asocian al hundimiento de la termoclina y reducción de la surgencia costera, mientras que las anomalías negativas de TSM se asocian a elevación de la termoclina y fortalecimiento de la surgencia. El nivel del mar también experimenta anomalías positivas (durante El Niño) y negativas (durante La Niña), en la región del Pacífico tropical y costa sudamericana.

La componente atmosférica del ciclo ENOS está asociada con una fluctuación interanual casi-sincrónica de dos sistemas de presión a gran escala: el sistema de baja presión atmosférica superficial, ubicado sobre el lado oeste del océano Pacífico ecuatorial, y el sistema de alta presión atmosférica super-

ficial (Anticiclón), ubicado en los subtrópicos orientales del océano Pacífico sur, respectivamente. El índice operacional más usado para identificar las fases de esta “Oscilación del Sur” (OS), se conoce con el nombre de Índice de la Oscilación del Sur (IOS). El IOS se define como la diferencia normalizada de la presión atmosférica media mensual entre la región de alta (Tahití) y baja (Darwin) presión, existiendo dos fases: una negativa (IOS negativo), caracterizada por el descenso de la presión atmosférica superficial en el sector oriental del océano Pacífico (El Niño), y otra positiva (IOS positivo), donde la presión atmosférica superficial aumenta en el mismo sector (La Niña). Las presiones en el lado oeste varían en oposición de fase respecto de las anteriores.

Inicialmente, el IOS fue estudiado por el científico británico Sir Gilbert Walker, quien además se interesó en estudiar, durante la primera mitad del siglo XX, las fluctuaciones del clima tropical para predecir la variabilidad de las precipitaciones en el monzón Índico. Él notó que en ciertos años la presión atmosférica era más alta sobre Indonesia y este del océano Índico, mientras que al mismo tiempo, se registraban presiones más bajas sobre la región tropical y subtropical del océano Pacífico.

En las regiones situadas hacia el este del océano Índico, las estaciones meteorológicas que contaban con datos buenos y confiables de presión atmosférica para la realización de los análisis de correlación que Sir Gilbert Walker utilizó en un principio para calcular el IOS, fueron Jakarta en Indonesia y Darwin en el norte de Australia. Al otro lado de la cuenca (océano Pacífico) utilizó las estaciones meteorológicas de Valparaíso y Santiago de Chile. Otros ensayos se realizaron también con isla de Pascua, pero lamentablemente estas localidades contaban con insuficientes registros de presión atmosférica (Rosendal, 1998).

El ciclo ENOS ocasiona una alteración en el régimen de precipitaciones a escala

global, observándose importantes anomalías positivas y negativas de pluviosidad en regiones características del planeta. Asimismo, se produce un debilitamiento (fase cálida) o incremento (fase fría) de los vientos alisios en la región del Pacífico tropical, con la consecuente retroalimentación en el océano. Así, los años de El Niño están asociados con un calentamiento del océano Pacífico ecuatorial central y oriental. Por el contrario, durante los años de La Niña se registra un enfriamiento del océano.

La fase cálida del ciclo ENOS puede afectar las condiciones meteorológicas en diversas localidades del mundo. En el océano Atlántico, cerca de la costa sur de África, a menudo ocurren sequías cuando esta fase está presente. De la misma manera, el lado oeste del océano Pacífico (Indonesia, Malasia, Nueva Guinea, Australia oriental), zona de intensas precipitaciones, sufre también sequía durante un período cálido del ciclo ENOS. Por el contrario, regiones que se caracterizan por ser normalmente secas e incluso áridas, se ven afectadas por anomalías positivas severas de precipitación, principalmente las costas de Ecuador y norte del Perú, y el centro de Chile (Rutllant & Fuenzalida, 1991; Voituriez & Jacques, 2000).

Las consecuencias socioeconómicas de las perturbaciones climáticas asociadas con la variabilidad del ciclo ENOS, pueden llegar a ser catastróficas. De hecho, en países como Zimbawe, cuya economía depende críticamente de la producción de maíz, los efectos de la sequía durante un evento El Niño pueden ser devastadores. Sin embargo, en la parte oeste de América del Sur, los agricultores pueden sacar provecho del cultivo de una cosecha muy buena de arroz, en vez de una cosecha normal de algodón, porque durante un episodio de El Niño suele llover más de lo normal en esa región.

Los dos episodios cálidos más importantes de los últimos 20 años (1982-1983 y 1997-1998), han suscitado intensos estu-

dios sobre sus respectivos impactos socioeconómicos, especialmente llevados a cabo por los organismos internacionales vinculados con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

El evento de 1982-1983 causó 2.000 víctimas y sus daños se estimaron en alrededor de 10 mil millones de dólares americanos (Voituriez & Jacques, 2000). Importantes sequías se produjeron en la zona nororiental de la República Popular China y en los alrededores de África, especialmente en los países pobres de Etiopía, Tanzania, Uganda y Zimbawe, causando graves repercusiones en la producción de cereales y una notable reducción de las cosechas de maíz. A raíz de la sequía también se desataron gigantescos incendios que afectaron principalmente a África del Sur, sur de la India, Sri Lanka, las Filipinas, Indonesia, Australia, sur del Perú, oeste de Bolivia, México y América Central (Voituriez & Jacques, 2000). Por otro lado, se produjeron intensas y persistentes precipitaciones a lo largo de la costa árida de América del Sur. Por ejemplo, en la costa de Ecuador, el agua caída fue 30 veces superior a lo normal (Guayaquil, junio de 1983), mientras que en el norte de Perú llegó a ser 340 veces superior a lo normal (Paita, mayo de 1983). Como consecuencia de esto, se produjeron importantes modificaciones en el paisaje, el aumento en el caudal de los ríos y la inundación de vastas regiones, con las consiguientes pérdidas de vidas humanas y materiales.

Si bien es cierto los episodios cálidos y fríos del ciclo ENOS pueden ser muy diferentes el uno del otro, actualmente las investigaciones buscan comprender mejor este fenómeno y las interacciones existentes entre la atmósfera, que es un fluido cuya estructura cambia rápidamente, y el océano, que cambia en forma mucho más lenta. Para ello, se han desarrollado diversos modelos numéricos y estadísticos de la atmósfera y del océano, los cuales están siendo

utilizados en combinación con datos satelitales. El principal objetivo de este tipo de estudios es la predicción de futuros eventos ENOS, para llegar a advertir a tiempo a los agricultores, pescadores y a la sociedad en general de sus posibles efectos, pudiendo así minimizarse los daños y aprovecharse sus potenciales beneficios.

FASE CÁLIDA DEL CICLO ENOS (EL NIÑO)

En general, la fase cálida del ciclo ENOS (El Niño) se caracteriza por un debilitamiento a gran escala de los vientos alisios y un calentamiento de la superficie del mar en el océano Pacífico ecuatorial del este y central. Este calentamiento se manifiesta a través de anomalías positivas de la TSM, las que se obtienen por la diferencia entre el valor observado, menos la media climatológica del lugar en el cual se realizó la medición. Además, se pueden observar presiones atmosféricas a nivel del mar mucho más altas que lo normal en el lado oeste del Pacífico tropical y en algunas regiones del océano Índico, y por el contrario, presiones atmosféricas a nivel del mar inusualmente bajas hacia el sureste del Pacífico tropical.

VIENTOS ALISIOS

Los vientos superficiales que soplan sobre los océanos en cada uno de los hemisferios, pueden agruparse en tres cinturones principales:

- Vientos alisios: desde los 0° a 30° de latitud.
- Vientos dominantes del oeste: desde los 30° a 60° de latitud.
- Vientos polares del este: desde los 60° a 90° de latitud.

En bajas latitudes y para ambos hemisferios, los alisios del noreste para el

hemisferio norte y alisios del sureste para el hemisferio sur, convergen hacia un área llamada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) cercana a la línea ecuatorial (Fig. 1).

Después de converger, los vientos alisios se dirigen en general, de este (América del Sur) a oeste (Indonesia). Durante los eventos de El Niño se produce un cambio en la intensidad y muchas veces en la dirección de estos vientos, es decir, bajo una condición cálida (El Niño) los alisios se relajan o debilitan en el oeste y centro del océano Pacífico o invierten completamente su dirección, soplando de oeste a este (Fig. 2). Por el contrario, durante la fase fría del ciclo ENOS (La Niña), estos vientos se refuerzan.

El debilitamiento de los vientos alisios genera una disminución en la surgencia ecuatorial, que facilita la aparición de anomalías positivas de TSM en el océano Pacífico del este, y un aumento del nivel del mar en dicha zona.

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Los patrones de calentamiento y enfriamiento cíclicos de la atmósfera, que se desarrollan en las zonas del centro y del este del Pacífico, coexisten con un cambio significativo de la presión atmosférica a nivel del mar. Esta diferencia de presión corresponde a la denominada Oscilación del Sur (OS).

Cuando la presión atmosférica aumenta en el lado este del Pacífico (y disminuye en el lado oeste), se dice que la OS está en su fase positiva (La Niña). Por el contrario, cuando la variación de la presión atmosférica cambia de sentido hacia la fase negativa (El Niño), la presión se eleva en el oeste y disminuye en el este. Esta alternancia entre las fases positiva y negativa del IOS, contribuye a cambiar la intensidad de la circulación de los vientos descrito anteriormente, debido a que un aumento/

disminución de esta diferencia de presión causa que el aire superficial, que normalmente sopla hacia el oeste, se intensifique/debilite dependiendo del signo del IOS imperante.

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, el Índice de Oscilación del Sur (IOS), utiliza los registros de presión atmosférica de las estaciones meteorológicas de Darwin-Australia (lado oeste del Pacífico) y Papeete-Tahití (lado este del Pacífico) (Fig. 3).

El IOS es negativo cuando los valores de presión atmosférica son relativamente más altos que la media normalizada sobre Indonesia y Australia (estación meteorológica de Darwin), y más bajos que la media normalizada sobre la Polinesia Francesa (estación meteorológica de Papeete). Si al mismo tiempo, se observan TSM más cálidas que lo normal sobre el Pacífico ecuatorial central y oriental, y ambas condiciones se mantienen por unos meses, podemos decir que nos encontramos en presencia de un evento El Niño en pleno desarrollo. En la figura 4, se aprecia claramente que durante los períodos cálidos del océano Pacífico tropical los valores negativos del IOS se correlacionan bastante bien con las ATSM positivas sobre el ecuador a 110° W (Por ejemplo: eventos El Niño 1982-83 y El Niño 1997-98).

PRECIPITACIÓN

En el lado oeste del Pacífico tropical existe una vasta reserva de calor representada por agua de mar con una temperatura cercana a los $28-29^{\circ}\text{C}$, región que se conoce comúnmente como "poza cálida". En esta región del océano se transfiere la máxima cantidad de energía a la atmósfera; debido a la condensación del vapor de agua en conglomerados nubosos del tipo cumulonimbos. Esta convección es la rama ascendente (baja presión atmosférica) de una celda de circulación atmosférica que se ubica a lo largo del ecuador y que se conoce con el nombre de Celda de Walker

(Fig. 5). La rama descendente de esta celda, se sitúa en el lado este del Pacífico, sobre aguas oceánicas más frías. Esta es una zona de altas presiones atmosféricas por lo que las precipitaciones son muy poco frecuentes en las costas del Perú y en el norte de Chile.

Durante el desarrollo de la fase cálida del ciclo ENOS, cuando se produce un debilitamiento de los vientos alisios (o su cambio de dirección) es posible que la poza cálida en el lado oeste del Pacífico, se traslade hacia el centro y este del Pacífico. Como consecuencia de ello, la convección atmosférica asociada sigue la evolución de la temperatura del mar, modificándose la circulación de Walker sobre el ecuador.

TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR Y TERMOCLINA

A lo largo del ecuador, el océano tropical está compuesto por tres capas: una somera que se caracteriza por ser cálida y bien mezclada; otra profunda, fría y estratificada, y entre estas capas una zona de transición denominada "termoclina", donde la temperatura del agua disminuye bruscamente con la profundidad. Al oeste del Pacífico ecuatorial, la termoclina se localiza, aproximadamente a 200 metros de profundidad, lo que implica una acumulación de aguas cálidas en el sector de Indonesia. En cambio, hacia el este del Pacífico ecuatorial, la termoclina alcanza típicamente unos 50 metros de profundidad, o menos, debido a la surgencia (Fig. 6).

Al comienzo de la fase cálida de un ciclo ENOS, se produce un aumento significativo de la TSM en el este del Pacífico ecuatorial y junto a la costa sudamericana. Este calentamiento está asociado a la propagación de una onda Kelvin oceánica que se desplaza de oeste a este por la base de la termoclina, y que se genera por bruscas fluctuaciones de los vientos alisios en el sector occidental del Pacífico. El desplazamiento de la onda Kelvin hacia el este (y de la cual se detallará más adelante), es

lo que induce la profundización de la termoclina en dicho sector, lo que permite el desarrollo de una capa cálida de mayor grosor (Figs. 5 y 6).

La presencia de esta capa cálida impide el ascenso de agua más profunda, fría y rica en nutrientes hacia la superficie (disminuye la surgencia), y es lo que produce una notable anomalía positiva de TSM en las regiones este y central del océano Pacífico, especialmente en las costas de Colombia, Ecuador, Perú y norte de Chile.

NIVEL DEL MAR Y SURGENCIA

Bajo condiciones normales, el efecto de los vientos alisios sobre el Pacífico ecuatorial, genera una corriente que se conoce como Corriente Ecuatorial, la que induce un cambio de pendiente en el nivel del mar, que se manifiesta como un ascenso de alrededor de 40 cm en el borde oeste del Pacífico en relación con el borde este (Fig. 6).

El efecto de la rotación terrestre en los bordes norte y sur de la corriente ecuatorial, genera una divergencia superficial de flujo a la que corresponde un ascenso de agua fría desde niveles más profundos. Esta agua fría se caracteriza por ser rica en nutrientes, con un alto contenido de oxígeno disuelto. Este proceso es conocido como "surgencia", sin embargo, cuando se desarrolla en zonas aledañas al ecuador se le denomina específicamente "surgencia ecuatorial", y cuando se desarrolla en zonas costeras, se le denomina "surgencia costera" (Fig. 7). Es importante mencionar que, tanto la surgencia ecuatorial como la surgencia costera, se concentran en angostas regiones (< 130 km de ancho), permitiendo allí el desarrollo de una abundante cantidad de fitoplancton sobre el cual se sustentan las grandes pesquerías en las costas del Pacífico sudeste.

Durante la fase cálida del ciclo ENOS, el nivel del mar aumenta en las costas del Pacífico del este y disminuye en el oeste,

como respuesta al debilitamiento de los vientos alisios. (Fig. 6). La surgencia por su parte, no desaparece en la franja costera, más bien cambia sus características, siendo el agua surgente cálida y pobre en nutrientes, debido principalmente a la profundización de la termoclina (Huyer *et al.*, 1987). Esto implica menores gradientes de temperatura entre la región costera y la región oceánica.

ONDAS

Como la mayoría de los sistemas físicos, el océano y la atmósfera propagan sus perturbaciones por medio de ondas. Así, por ejemplo, cuando la Luna y el Sol atraen las masas de agua, nace una nueva onda de marea que se propaga por el océano y se amplifica, subiendo por la plataforma continental para penetrar en los mares litorales. Por otra parte, toda onda es acompañada por el movimiento de las partículas del fluido en el que se transmite. En el caso de una ola de mar, el movimiento de partículas es en el plano vertical, sin desplazamiento de masa. En el caso de ondas con una longitud de onda amplia, los movimientos horizontales efectúan un cierto desplazamiento de masa, de modo que se comportan como verdaderas corrientes.

El océano ecuatorial constituye una excelente "guía de ondas", cuando éstas se propagan hacia el este debido al cambio en el sentido del efecto de Coriolis y a la presencia de una termoclina permanente. Una variación del viento a lo largo de la banda ecuatorial, se propagará fácilmente como dos tipos de ondas, ondas Kelvin y ondas Rossby. Las ondas ecuatoriales de Kelvin son ondas planetarias, cuya longitud de onda es grande en relación con la profundidad del mar. Éstas se propagan únicamente hacia el este a velocidades del orden de los 200 kilómetros por día y quedan atrapadas en el ecuador por el efecto de Coriolis ya mencionado. Por otra parte, las ondas de Rossby son ondas planetarias de gran longitud que existen en todas las latitudes y se propagan únicamente hacia el oeste. Su velocidad de

desplazamiento depende de numerosos factores, entre los cuales se encuentran la longitud de onda, la estratificación del océano, la velocidad de las corrientes sobre las cuales las ondas de Rossby se superponen y, sobre todo, la latitud.

Generalmente, un intenso pulso de viento del oeste asociado con una perturbación atmosférica de carácter intraestacional (oscilación de Madden-Julian) en el sector occidental del Pacífico, es responsable del inicio y propagación de ondas internas ecuatoriales u ondas Kelvin (McPhaden, 1999) (Fig. 8). Cuando las ondas Kelvin logran llegar a la orilla de la cuenca oceánica, se reflejan sobre las costas cambiando de naturaleza puesto que cambian de sentido de propagación. En el este, las ondas Kelvin reflejadas vuelven a partir hacia el oeste en forma de ondas Rossby y viceversa.

Una onda Kelvin parece ser uno de los factores principales para un proceso de retroalimentación positiva entre el océano y la atmósfera, conducente al desarrollo de la fase cálida de un ciclo ENOS. En ese caso, la onda Kelvin se propagará hasta chocar con la costa del continente americano, transportando energía hacia el este y produciendo profundización de la termoclina, aumento del nivel del mar e incrementos en los valores de TSM entre otros factores. Una vez en la costa, la onda Kelvin se dividirá en una Rossby que se reflejará hacia el oeste y en dos nuevas ondas Kelvin que viajarán atrapadas a la costa en dirección hacia los polos (Fig. 9).

FASE FRÍA DEL CICLO ENOS (LA NIÑA)

La Niña produce una intensificación del funcionamiento de la celda de Walker: reforzamiento de los vientos alisios, acumulación de aguas cálidas al oeste del Pacífico,

fortalecimiento de la surgencia frente a las costas de Ecuador, Perú, norte de Chile y divergencia ecuatorial.

VIENTOS ALISIOS

En presencia de La Niña, los vientos que soplan normalmente hacia el oeste a lo largo del Pacífico tropical se intensifican, favoreciendo el ascenso de aguas mucho más profundas y, por lo tanto, más frías que lo normal hacia la superficie en el lado este del Pacífico ecuatorial. Como consecuencia de esto, disminuye la profundidad de la termoclina y se observa la presencia de anomalías negativas de TSM y nivel del mar en dicho sector (Figs. 2, 5 y 6).

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Durante la fase fría del ciclo ENOS, la presión atmosférica es más baja que lo normal sobre el sector de Indonesia y el norte de Australia y más alta que lo normal sobre el Pacífico tropical del este (IOS positivo, Fig. 4). Esto explica la intensificación de los vientos alisios que soplan hacia el este cercanos a la superficie sobre el Pacífico ecuatorial.

PRECIPITACIONES

A consecuencia del enfriamiento de las aguas en la banda central del océano Pacífico ecuatorial, localizada aproximadamente entre los 5° de latitud norte y 5° de latitud sur, y la correspondiente intensificación de la celda de Walker, se presentan anomalías en la circulación atmosférica tropical, las que se manifiestan principalmente en un déficit de precipitaciones que se desarrolla hacia el lado este del Pacífico. Se observan condiciones atmosféricas más secas que lo normal alrededor del trópico, y a lo largo de las latitudes subtropicales de América del Sur (sur de Brasil y sector central de Argentina, Perú y norte-centro de Chile). Al mismo tiempo, la lluvia es muy abundante sobre Indonesia, Malasia y Norte de Australia.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece en forma especial al Señor Leopoldo Toro Videla, Diseñador del Departamento de Oceanografía del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, por su cooperación en la edición y confección de las figuras de este artículo.

REFERENCIAS

- Capel, J. 1999. El Niño y el sistema climático terrestre. Editorial Ariel, S.A. Barcelona, Primera Edición, 154 pp.
- Enfield, D. B. 1989. El Niño, Past and Present. *Reviews of Geophysics*, 27: 159-87.
- Glantz, M. 1996. Corrientes de Cambio: El Impacto de El Niño sobre el Clima y la Sociedad. Cambridge University Press, Cambridge, 141 pp.
- Huyer, A., R. Smith & T. Palusz-kiewes. 1987. Coastal upwelling off Perú during normal and El Niño times, 1981-1984. *J. Geophys. Res.*, 92(13): 14.297-14.307.
- International Space University. 2000. ENSO: A Global Challenge and Keys to a Solution. Summer Session Program, 500 pp.
- McPhaden, M. 1999. Genesis and Evolution of the 1997-98 El Niño. *Science*, 283: 950-954.
- Philander, S. G. 1989. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. International Geophysics series. Academic Press, Inc. Vol.46, 293 pp.
- Pizarro, O. 1999. Low Frequency Fluctuations in the Eastern Boundary Current off South America: Remote and Local Forcing. Doctoral Thesis, Göteborg University, 36 pp.
- Quinn, W., V. T. Neal & S.E.A. Mayolo. 1987. El Niño occurrences over the past four and half centuries. *Journal of Geophysical Research*, 92, C13, 14.449-61.
- Rosendal, H. 1998. El Niño becomes La Niña. *Miscellaneous Weather*. National Weather Service, Honolulu, Hawaii.
- Rutllant, J. & H. Fuenzalida. 1991. Synoptic Aspects of the Central Chile Rainfall Variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 11: 63-76.
- Voituriez, B. & G. Jacques. 2000. El Niño: Realidad y Ficción, UNESCO, Francia, 142 pp.
- Servicio Meteorológico Nacional de la Fuerza Aérea Argentina. Boletín Informativo N° 54, "El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur", 16 pp.

Principales páginas WEB consultadas:

- NOAA/Climate Diagnostic Center. El Niño Southern Oscillation (ENSO). www.cdc.noaa.gov/ENSO/
- NOAA/JAMSTEC. Realtime El Niño and La Niña data from the tropical Pacific Ocean provided by TAO/TRITON buoys. www.pmel.noaa.gov/togatao/realtime.html
- NOAA/PMEL/TAO. El Niño Theme Page. www.pmel.noaa.gov/tao/elNino/nino-home.html; www.ucar.edu/communications/factsheets/elNino/
- US Navy's Fleet Numerical and Meteorology and Oceanography Center. El Niño and La Niña for de Navy. www.oc.nps.navy.mil/webmodules/ENSO/

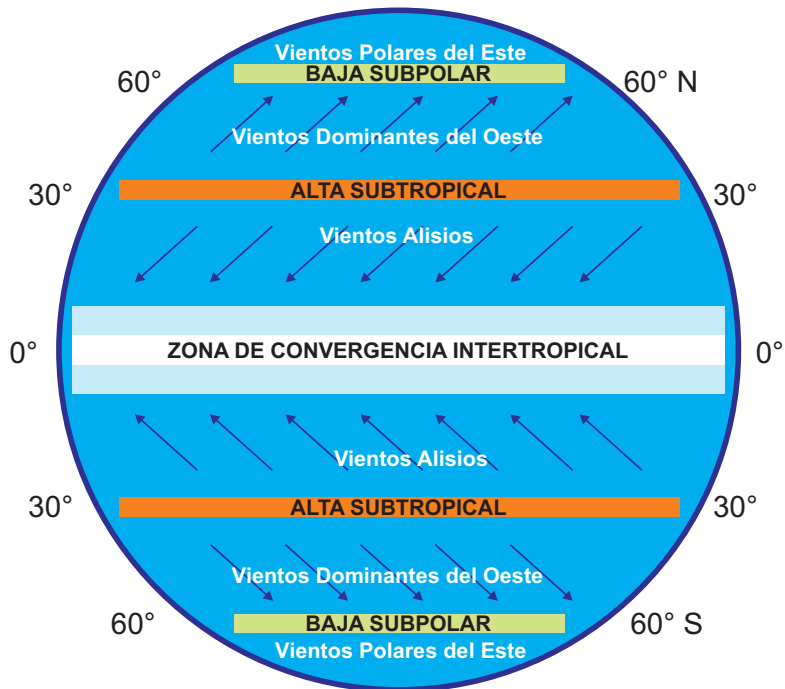


Fig. 1: Modelo esquemático de circulación de vientos sobre una Tierra homogénea.

Fig. 1: Schematic diagram of wind circulation over an homogeneous Earth.

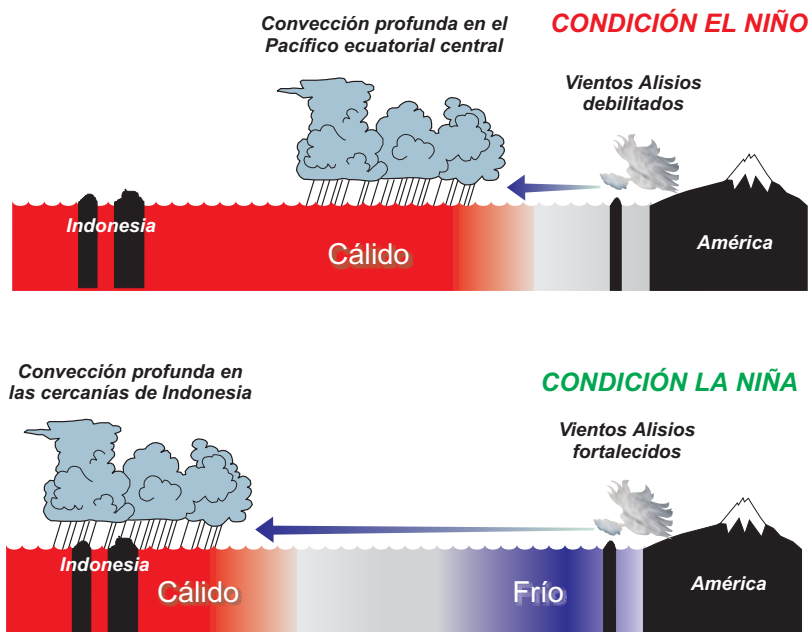
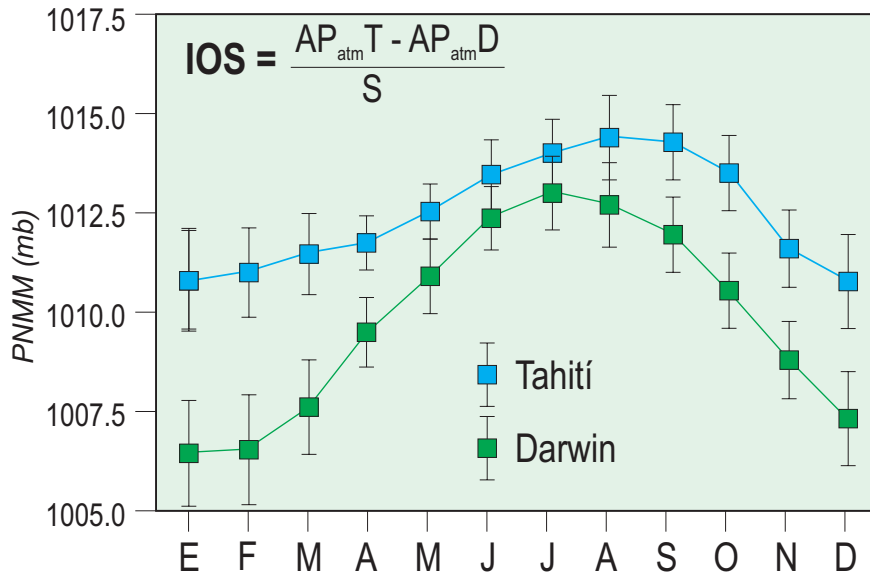


Fig. 2: Modelo de viento, precipitación y temperatura del mar en las fases extremas del ciclo ENOS. (Fuente: NOAA/PMEL/TAO Project Office).

Fig. 2: Wind, precipitation and sea temperature model at the extreme phases of the ENSO cycle. (Source: NOAA/PMEL/TAO Project Office).



Donde:

$AP_{atm} T$ = Anomalía mensual normalizada de la presión atmosférica a nivel del mar en Tahití.

$AP_{atm} D$ = Anomalía mensual normalizada de la presión atmosférica a nivel del mar en Darwin.

S = Desviación estándar media anual de las diferencias de las anomalías mensuales normalizadas de la presión atmosférica en Tahití y Darwin.

Fig. 3: Variación anual media de la presión a nivel del mar en Tahití y Darwin.

Fig. 3: Mean annual variation of sea level pressure in Tahiti and Darwin.

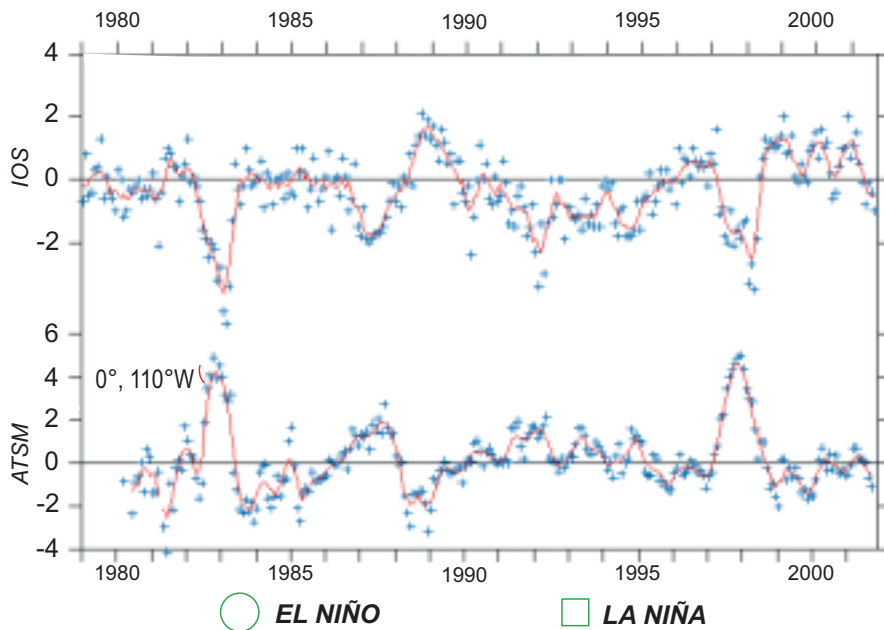


Fig. 4: Series del Índice de Oscilación del Sur (IOS) y de la Anomalía de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) sobre el ecuador a 110° W.

Fig. 4: Southern Oscillation Index (SOI) and Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA) time series on equator at 110° W.

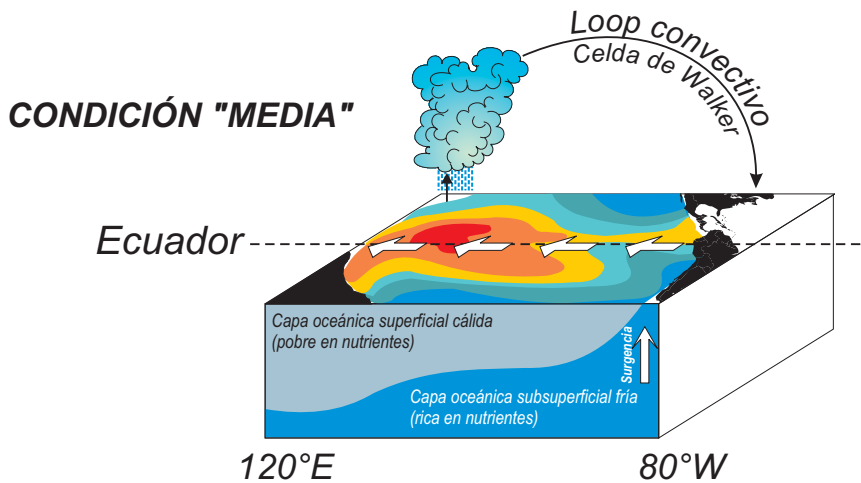
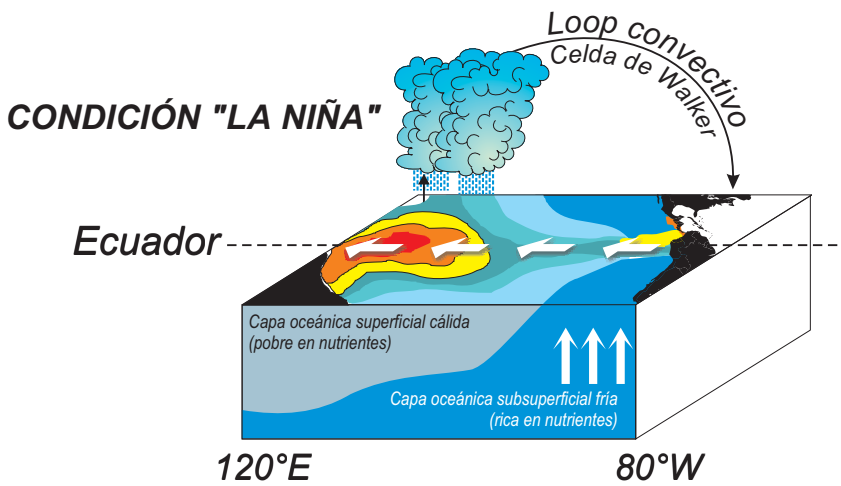
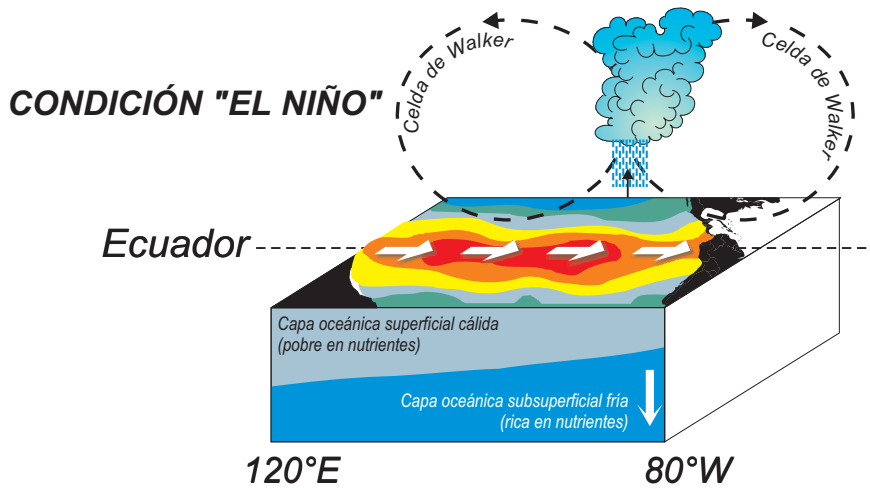
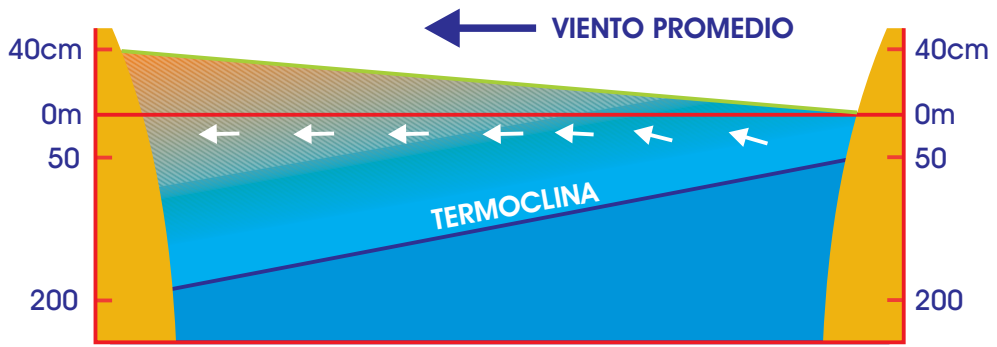
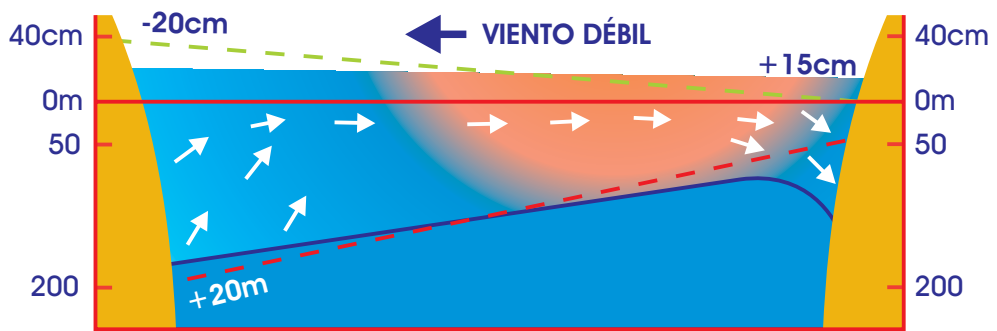


Fig. 5: Modelo de convección, temperatura del mar y surgencia, bajo condiciones de El Niño, La Niña y Media.

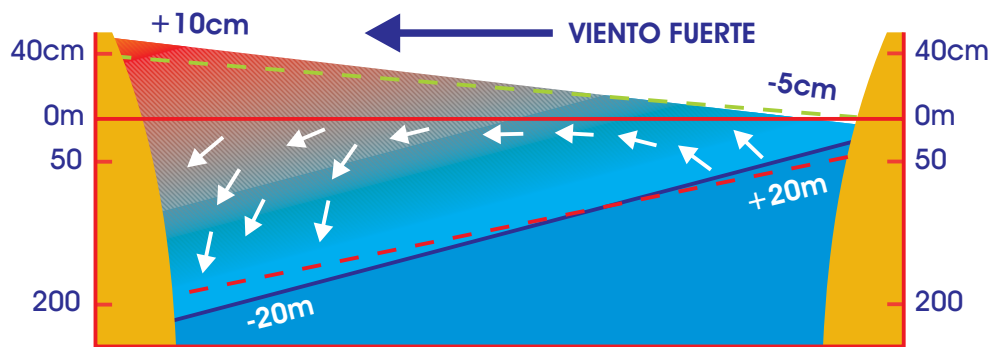
Fig. 5: Convection, sea temperature and upwelling model under El Niño, La Niña and mean conditions.



MEDIA



EL NIÑO



LA NIÑA

Fig. 6: Modelo esquemático de anomalías en la termoclina y nivel del mar, bajo condiciones Media, El Niño y La Niña.

Fig. 6: Schematic diagram of thermocline and sea level anomalies, under El Niño, La Niña and "Normal" conditions.

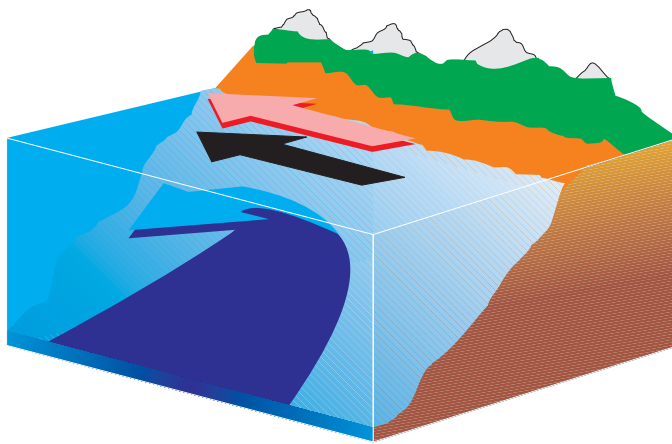


Fig. 7: Modelo de surgencia ecuatorial y surgencia costera.

Fig. 7: Equatorial and coastal upwelling model.



Fig. 8: Proceso de inicio de onda Kelvin y su desplazamiento desde el oeste del Pacífico hacia la zona costera del Ecuador.

Fig. 8: Beginning of eastward propagation of a kelvin wave to the Equator coast.

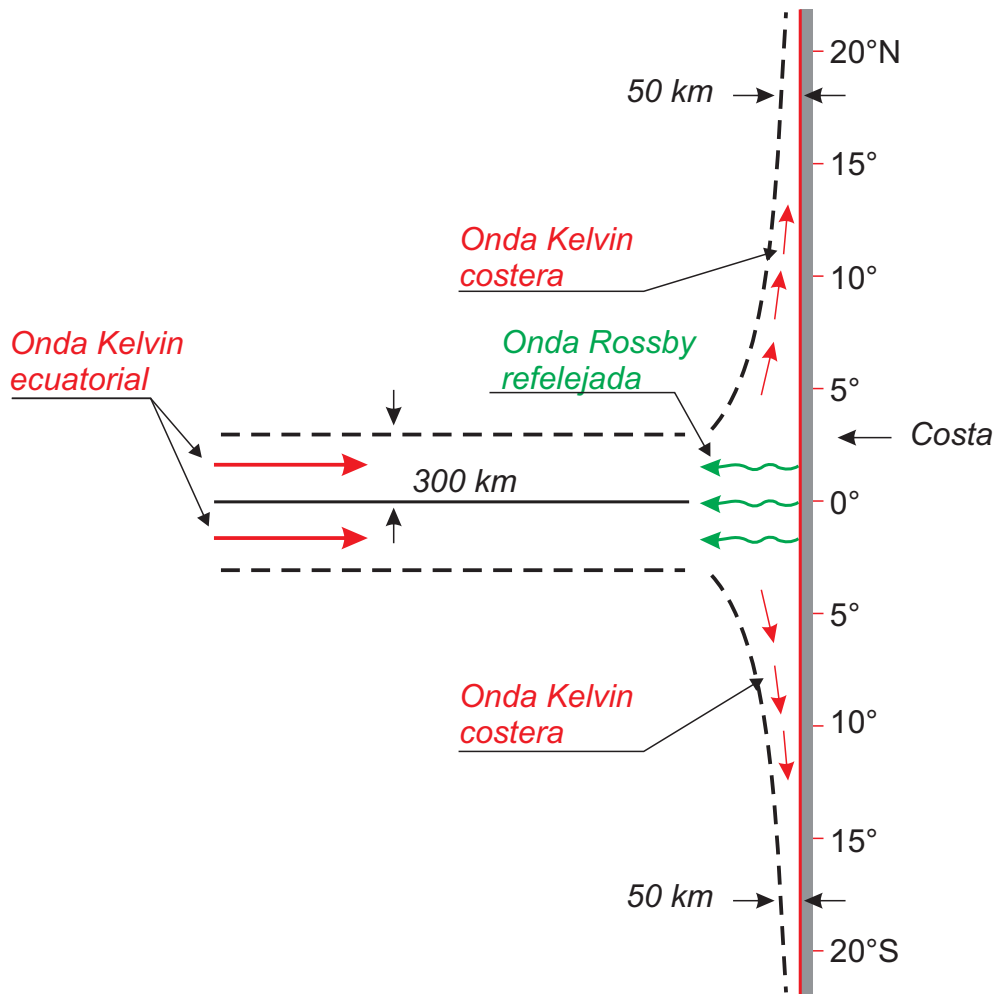


Fig. 9: Modelo de ondas en el Ecuador.

Fig. 9: Equatorial waves model.