



**MARN**

Ministerio de Medio Ambiente  
y Recursos Naturales

# Variabilidad del campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Metodología.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Resultados .....</b>	<b>11</b>
<b>4. Discusión.....</b>	<b>12</b>
<b>5. Referencias .....</b>	<b>14</b>
<b>6. Figuras .....</b>	<b>15</b>
<b>7. Tablas .....</b>	<b>27</b>

## Resumen

La estimación de valores de parámetros de variables hidrodinámicas, que son superados al menos una vez cada cierto número de años, umbrales asociados a períodos de retorno, son necesarios para el diseño de barcos, estructuras de protección costera, plataformas en mar abierto y para la elaboración de mapas de riesgo por inundación costera. En el diseño de barcos y plataformas en mar abierto se requiere la estimación de los umbrales con períodos de retorno entre 10 y 100 años, para estructuras de protección costera entre 1,000 y 10,000 años y para la elaboración de mapas de riesgo por inundación costera se requiere la estimación de los umbrales con período de retorno entre 100 y 1,000 años. Usualmente las series temporales de mediciones de variables hidrodinámicas son entre 1 y 10 años y las de salidas de modelos entre 10 y 100 años por lo que, para obtener los umbrales asociados a los períodos de retorno referidos, es usual recurrir a los métodos estadísticos del largo plazo basados en la teoría del Análisis de Valores Extremos (AVE). Los métodos estadísticos de largo plazo se utilizan para analizar los eventos extremos en series temporales largas. Son necesarios para conocer, por ejemplo: ¿Cuál es la potencia máxima del oleaje al que estará expuesta una infraestructura que ha sido diseñada para una vida útil de 25 años? Los eventos del campo extremo, que pueden generar grandes impactos, por lo general tienen una alta variabilidad en intensidad y frecuencia. Por definición son considerados poco frecuentes. Los métodos estadísticos de largo plazo deben estimar los parámetros de los eventos del campo extremo a partir de una pequeña muestra con una alta variabilidad. En la caracterización del campo medio (clima) del oleaje frente a la costa de El Salvador (DOA/MARN, 2017), se propuso al percentil 95 ( $32 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) como umbral de impacto bajo, el percentil 99 ( $44 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) como umbral de impacto medio y al percentil 99.9 ( $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) como umbral de impacto alto. Para la caracterización del campo extremo del oleaje se generó la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA) considerando los máximos anuales y la Serie de Valores de Eventos Extremos (SVEE) considerando estados de mar, valor promedio cada 3 horas, mayores que el percentil 99.99 ( $74 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Para calcular los períodos de retorno de las series de valores extremos de la potencia, se estimaron los parámetros de la Función de Distribución de Probabilidad Generalizada de Valores Extremos (FDP/GVE), con el Método de Máxima Similitud y un intervalo de confianza del 95%. Con el valor de los parámetros, se calculó la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada Generalizada de Valores Extremos. La convergencia de la probabilidad de no excedencia de las series de valores extremos de la potencia muestra que la FDP/GVE que mejor se ajustó a las SVEA es del tipo III o Weibull y a las SVEE es del tipo II o Frechet. Para calcular el umbral asociado a un período de retorno se empleó la Función de Distribución de Probabilidad Inversa Generalizada de Valores Extremos. Para calcular la probabilidad de ocurrencia de que la potencia del oleaje supere al menos una vez los valores de diseño durante la vida útil de una

infraestructura, se estimó el intervalo de tiempo promedio entre eventos del campo extremo: 1 año para la SVEA; 3 años para la SVEE. Dos de los hallazgos de la caracterización del campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador son las frecuencias por estación de los valores extremos anuales [9% (EFM), 43% (AMJ), 20% (JAS), 28% (OND)] y los umbrales para períodos de retorno menor que 5 años [38 kW-m-1 (1 año), 66 kW-m-1 (2 años), 74 kW-m-1 (3 años), 78 kW-m-1 (4 años)]. El primer hallazgo es que los eventos del campo extremo de la potencia del oleaje se pueden observar con mayor frecuencia en los meses de transición de estación (lluviosa, seca), dado que los meses en que la frecuencia es mayor o igual que 10% son Abril (20%), Mayo (19%), Octubre (11%) y Noviembre (17%). El segundo hallazgo es que los eventos del campo extremo, oleaje cuya potencia sea mayor que  $75 \text{ kW-m}^{-1}$ , tienen un período de retorno de 2 años y una probabilidad de ocurrencia de 70%.

## 1. Introducción

La estimación de valores de parámetros de variables hidrodinámicas, que son superados al menos una vez cada cierto número de años, umbrales asociados a períodos de retorno, son necesarios para el diseño de barcos, estructuras de protección costera, plataformas en mar abierto y para la elaboración de mapas de riesgo por inundación costera. En el diseño de barcos y plataformas en mar abierto se requiere la estimación de los umbrales con períodos de retorno entre 10 y 100 años, para estructuras de protección costera entre 1,000 y 10,000 años y para la elaboración de mapas de riesgo por inundación costera se requiere la estimación de los umbrales con período de retorno entre 100 y 1,000 años. Usualmente las series temporales de mediciones de variables hidrodinámicas son entre 1 y 10 años y las de salidas de modelos entre 10 y 100 años por lo que, para obtener los umbrales asociados a los períodos de retorno referidos, es usual recurrir a los métodos estadísticos del largo plazo basados en la teoría del Análisis de Valores Extremos (AVE) (Caires, 2011).

Procesando mediciones de oleaje en las inmediaciones de plataformas al Norte del Mar Adriático, se generó la Serie de Valores Extremos Mensuales (SVEM) y la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA), se estimaron los parámetros de localización, escala y forma con el Método de Máxima Similitud (MMS) y se seleccionó la Función de distribución de Probabilidad (FDP) Generalizada de Valores Extremos (GVE). El resultado fue que la que mejor se ajustó fue la del Tipo I (Gumbel), obteniendo los umbrales mensual y anual con períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años de la altura significativa del oleaje (Leder et al, 1998).

Con el objetivo de estimar los umbrales con períodos de retorno asociados, de la altura significativa del oleaje, para ser usados en el diseño de estructuras costeras de protección, se analizaron mediciones de oleaje frente al puerto Galle al Suroeste de Sri Lanka. La serie temporal se dividió en sus componentes (mar local generado por viento local, mar de leva generado por viento lejano y la suma de ambos componentes) y para las estaciones (Mayo – Septiembre, Octubre – Noviembre, Diciembre – Febrero, Marzo – Abril). El sistema atmosférico dominante en el Océano Índico, Los Monzones, se presentan en la primera estación. Para cada una de las componentes del oleaje, se obtuvieron las Series de Valores Extremos Estacionales (SVEE) con el Método de Evento Extremo (POT por sus siglas en inglés). Las SVEE se ajustaron a la FDP/GVE, estimando parámetros con el MMS. El resultado fue que en las estaciones Mayo – Septiembre y Octubre – Noviembre, el mejor ajuste se obtuvo con: Tipo I (Gumbel) para mar local; Tipo III (Weibull) para mar de leva; Tipo II (Frechet) para la suma de ambos componentes. Los mayores umbrales corresponden

al mar local en la estación Mayo – Septiembre (durante Los Monzones) por lo que son los que se recomiendan para el diseño de estructuras costeras (Thevasiyani y Perera, 2014).

El análisis estadístico de series temporales (1 de Enero de 1958 – 31 de Diciembre de 1999), de estados de mar (promedio sobre 3 horas), de parámetros del oleaje (altura, significativa, período y dirección de la componente más energética), obtenidos con el modelo WAM (WAM-DI Group, 1988) forzado con el viento de la base de datos de re-análisis ERA-40 (Uppala et al, 2005), en localizaciones (nodos) frente a la costa italiana, produjo los siguientes resultados: (i) tendencia negativa en el promedio anual y de invierno de la altura significativa; (ii) cambio en el signo de la tendencia, a finales de la década de 1980 en el Norte del Mar Adriático, en número de estados de mar por año y promedio anual de la altura significativa, durante eventos “Bora” (estados del mar con dirección de componente más energética del sector 0° - 90° con respecto al Norte Geográfico); (iii) tendencia del promedio anual de la duración de estados de mar que sobrepasan los umbrales percentil 50, percentil 75 y percentil 90 de la altura significativa no es estadísticamente diferente de cero; (iv) los umbrales con períodos de retorno menor que 100 años son mayores cuando se ajustó la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA) que la Serie de Valores de Eventos Extremos (SVEE) a Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP) Generalizada de Valores Extremos (GVE) (Martucci et al, 2010).

Para investigar el campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador, se procesaron y analizaron las series temporales horarias de los parámetros del oleaje (altura significativa, período y dirección de la componente más energética), que resultan de la simulación con el modelo WAM (Osuna, 2010). Un parámetro derivado de la altura (energía potencial) y del período (energía cinética) del oleaje es la potencia o flujo de energía, la cual se puede estimar con la siguiente relación:

$$\bar{P} = \bar{E}C_g \cong \frac{1}{2}T_p H_s^2$$

Las unidades de la relación anterior son kW/m porque es el flujo de energía por unidad de longitud del frente del oleaje. Las series temporales son desde Febrero de 1968 hasta Diciembre de 2009 en tres localizaciones frente a la costa de El Salvador (Figura 1): Nodo 1, 13° N – 90° W (90 km frente a Punta Remedios); Nodo 2, 13° N – 89° W (60 km frente a la desembocadura del río Lempa); Nodo 3, 13° N – 88° W (30 km frente a punta Amapala).

## 2. Metodología

Los métodos estadísticos de largo plazo se utilizan para analizar los eventos extremos en series temporales largas. Son necesarios para conocer, por ejemplo: ¿Cuál es la potencia máxima del oleaje ( $P_{mw}$ ), al que estará expuesta una infraestructura que ha sido diseñada para una vida útil de 25 años? (Thompson, 2002).

Los eventos del campo extremo, que pueden generar grandes impactos, por lo general tienen una alta variabilidad en intensidad y frecuencia. Por definición son considerados poco frecuentes. Los métodos estadísticos de largo plazo deben estimar los parámetros de los eventos del campo extremo a partir de una pequeña muestra con una alta variabilidad.

Por lo tanto, los métodos estadísticos de largo plazo deben ser capaces de:

- ✓ Extender la información disponible a un intervalo de tiempo mayor. Por ejemplo, como estimar el valor extremo para los próximos 25 años a partir de 10 años de información.
- ✓ Usar una pequeña muestra de valores extremos para obtener estimaciones sin sesgo y con algún nivel de confianza aceptable.

Los procesos costeros es un ejemplo de proceso estocástico<sup>1</sup>, desde el punto de vista estadístico, porque la evolución en el largo plazo del transporte de sedimentos, responsable de darle forma a la línea de costa, depende tanto de una gran variedad de eventos del campo medio como de los relativamente pocos frecuentes eventos del campo extremo, los cuales pueden ocasionar la muerte de muchas personas y grandes pérdidas económicas. Las series temporales de las variables dinámicas que controlan los procesos costeros (marea, oleaje, viento y sus corrientes asociadas) son sucesiones de eventos que pueden ser caracterizados por su período de retorno y probabilidad de ocurrencia que se obtiene a partir de su Función de Distribución de Probabilidad (FDP).

Existen FDP para eventos del campo medio como para eventos del campo extremo. Estas últimas se han desarrollado a partir de la teoría del Análisis de Valores Extremos (EVA), que establece que los valores extremos de un conjunto de variables aleatorias pueden converger

---

<sup>1</sup> En estadística, y específicamente en la teoría de la probabilidad, un proceso estocástico es un concepto matemático que sirve para tratar con magnitudes aleatorias que varían con el tiempo, o más exactamente para caracterizar una sucesión de variables aleatorias (estocásticas) que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo. Cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad y pueden o no, estar correlacionadas entre ellas.

a tres tipos de FDP (Fisher y Tippett, 1928) cuyas expresiones matemáticas son funciones que incluyen los parámetros de localización ( $\alpha$ ), escala ( $\beta$ ) y forma ( $\gamma$ ):

Nombre	Expresión matemática
Tipo I o Gumbel	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-e^{\left[\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]-\frac{(x-\alpha)}{\beta}}\right]} \quad \gamma = 0$
Tipo II o Frechet	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\right] \left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{\left(-1-\frac{1}{\gamma}\right)}} \quad \gamma > 0$
Tipo III o Weibull	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\right] \left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{\left(-1-\frac{1}{\gamma}\right)}} \quad \gamma < 0$

El procedimiento para identificar la FDP que mejor se ajusta a una serie de eventos del campo extremo, consiste en: seleccionar eventos del campo extremo; estimar parámetros de las FDP; seleccionar FDP.

Algunos criterios a tomar en cuenta para la selección de eventos son los siguientes:

- ✓ Se deben seleccionar solo los eventos que sean representativos del campo extremo.
- ✓ Se deben seleccionar eventos diferentes para asegurar la independencia estadística entre eventos.
- ✓ Los eventos seleccionados deben representar eventos del campo extremo.
- ✓ Los eventos del campo extremo se consideran estacionarios es decir sin tendencia como la que está asociada al calentamiento global.
- ✓ No se deben de tomar toda la serie temporal original porque esta contiene información de los eventos del campo medio como eventos del campo extremo.

Hay dos métodos para seleccionar eventos del campo extremo. El primero método selecciona los eventos del campo extremo que sobrepasan un umbral y que están separados un cierto intervalo de tiempo, creando Series de Valores de Eventos Extremos (SVEE). El segundo método selecciona el valor extremo de cada año creando Series de Valores Extremos Anuales (SVEA). La SVEE puede tener un número de valores igual que el número de años o más dependiendo del umbral seleccionado. La SVEA se recomienda para series temporales de más de 20 años. La SVEE contiene información de todos aquellos eventos que sobrepasan el umbral, mientras que al SVEA solo contiene información de los eventos máximos de cada año.

Para la estimación de parámetros se deben considerar varios supuestos. Las Series de Valores Extremos (SVE) son una muestra de un proceso cuya FDP puede converger a alguna de las



que se obtienen con EVA. No todos los valores de las SVE se aproximarán a una FDP de valores extremos. Las SVE para algunas variables hidrodinámicas como la marea se aproximarán a una FDP de valores extremos específica, mientras que para otras variables como el oleaje se aproximarán a una serie de FDP de valores extremos por lo que se hace necesario seguir alguno de los métodos de ajuste. Hay dos métodos para estimar los parámetros de las FDP de valores extremos que mejor se ajusten a las SVEE y SVEA.

El primer método consiste en graficar la SVE en la gráfica de la FDP de valores extremos. Para facilitar la identificación de la FDP de valores extremos que mejor se ajuste a la SVE, se recomienda transformar el eje de la probabilidad a escala logarítmica para que la gráfica de la FDP se aproxime a una línea recta. El segundo método consiste en ajustar a las SVE la FDP de valores extremos ya sea por el Método de Mínimos Cuadrados (MMC) o el Método de Máxima Similitud (MMS). El MMC es recomendable para SVE sin valores atípicos y FDP de valores extremos de dos parámetros. El método de MMS es recomendable para SVE con valores atípicos y FDP de valores extremos de tres parámetros.

Al identificar valores atípicos se debe verificar su validez. Los valores atípicos pueden ser errores sistemáticos en las mediciones o simulaciones en cuyo caso se deben eliminar. También pueden ser valores generados por eventos del campo extremo en cuyo caso se deben de mantener. Para distinguir entre uno y otro se deben de inspeccionar por separado los eventos del campo extremo de las variables hidrodinámicas identificando sus características. Por ejemplo, los eventos del campo extremo del oleaje pueden ser generados por el viento de tormentas lejanas o cercanas. Los eventos del campo extremo de oleaje generados por tormentas lejanas, mar de leva incrementado, tienen una duración típica de 3 a 5 días con varios máximos, generalmente uno diario. Los eventos del campo extremo de oleaje generados por tormentas cercanas, mar local incrementado, tienen una duración típica de 1 día con un solo máximo.

La FDP de valores extremos que se selecciona es la que mejor se ajusta a las SVE. Un criterio de selección es la inspección de la gráfica de la Función de Distribución de la Probabilidad Acumulada ( $FDP_a$ ) contra la SVE. Otro criterio de selección es pruebas estadísticas como la correlación entre la  $FDP_a$  y la SVE. Para que la selección de la FDP sea más robusta, se debe calcular el Intervalo de Confianza (IC) de la estimación de parámetros. Una vez seleccionado la FDP de valores extremos que mejor se ajusta a la SVE se pueden calcular el período de retorno y la probabilidad de ocurrencia.

El período de retorno ( $T_r$ ) es el intervalo de tiempo promedio que transcurre entre eventos cuya potencia sea mayor o igual que el valor de diseño ( $V_r$ ).

El período de retorno se calcula con la siguiente relación:

$$T_r = \frac{t}{1 - P(V_r)}$$

Donde  $t$  es el intervalo de tiempo promedio entre eventos del campo extremo y  $P(V_r)$  es la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada (FDP<sub>a</sub>) del valor de diseño ( $V_r$ ).

La probabilidad de ocurrencia ( $P_o$ ) es la probabilidad de que en un intervalo de tiempo preestablecido ( $L$ ) ocurra al menos un evento cuya potencia sea mayor o igual que el valor de diseño ( $V_r$ ) correspondiente a un determinado período de retorno ( $T_r$ ).

La probabilidad de ocurrencia se calcula con la siguiente relación:

$$P_o = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^L$$

Donde  $L$  es la vida útil de una infraestructura.

### 3. Resultados

En la caracterización del campo medio (clima) del oleaje frente a la costa de El Salvador (DOA/MARN, 2017), se propuso al percentil 95 ( $32 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) como umbral de impacto bajo, el percentil 99 ( $44 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) como umbral de impacto medio y al percentil 99.9 ( $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) como umbral de impacto alto (Figura 2).

Para la caracterización del campo extremo del oleaje se generó la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA) considerando los máximos anuales y la Serie de Valores de Eventos Extremos (SVEE) considerando estados de mar<sup>2</sup>, valor promedio cada 3 horas, mayores que el percentil 99.99 ( $74 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

Para calcular los períodos de retorno de las series de valores extremos de la potencia, se estimaron los parámetros (Tabla 1) de la Función de Distribución de Probabilidad Generalizada de Valores Extremos (FDP/GVE), con el Método de Máxima Similitud y un intervalo de confianza del 95%.

Con el valor de los parámetros, se calculó la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada Generalizada de Valores Extremos. La convergencia de la probabilidad de no excedencia de las series de valores extremos de la potencia muestra que la FDP/GVE que mejor se ajustó a las SVEA es del tipo III o Weibull (Figura 3) y a las SVEE es del tipo II o Frechet (Figura 4).

Para calcular el umbral asociado a un período de retorno (Tabla 2) se empleó la Función de Distribución de Probabilidad Inversa Generalizada de Valores Extremos.

Para calcular la probabilidad de ocurrencia (Tabla 3) de que la potencia del oleaje supere al menos una vez los valores de diseño durante la vida útil de una infraestructura, se estimó el intervalo de tiempo promedio entre eventos del campo extremo: 1 año para la SVEA; 3 años para la SVEE.

---

<sup>2</sup> Estado del mar: Estado de la superficie del mar durante un intervalo de tiempo en donde las condiciones (marea, oleaje, viento) se consideran constantes. Por lo general se acepta que el intervalo de tiempo es entre 3 y 6 horas.

## 4. Discusión

Dos de los hallazgos de la caracterización del campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador son las frecuencias por estación de los valores extremos anuales [9% (EFM), 43% (AMJ), 20% (JAS), 28% (OND)] y los umbrales para períodos de retorno menor que 5 años [ $38 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  (1 año),  $66 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  (2 años),  $74 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  (3 años),  $78 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$  (4 años)].

El primer hallazgo es que los eventos del campo extremo de la potencia del oleaje se pueden observar con más frecuencia en las estaciones de Abril-Mayo-Junio y Octubre-Noviembre-Diciembre, dado que los meses en que la frecuencia es mayor o igual que 10% son Abril (20%), Mayo (19%), Octubre (11%) y Noviembre (10%). El segundo hallazgo es que los eventos del campo extremo de la potencia del oleaje que superen el umbral de impacto bajo se pueden observar con un período de retorno de 1 año y una probabilidad de ocurrencia del 100%, mientras que los que superen el umbral de impacto alto con un período de retorno de 2 años y una probabilidad de ocurrencia de 75%.

Con el fin de explicar el porqué del primer hallazgo, se analizó una caracterización de los ciclones extra-tropicales que, comparando bases de datos de re-análisis estimaron, aplicando regresión lineal, la tendencia estacional para 100 años de la densidad e intensidad de los ciclones extra-tropicales (Wang, Feng, Chan, Isaac. 2016). Las series temporales (1979 – 2009) de presión atmosférica a nivel del mar son los promedios de las estaciones (EFM, AMJ, JAS, OND) sobre las áreas totales de los Hemisferios (Norte, Sur) y de sus regiones (tierra, mar). Las bases de datos de re-análisis fueron: ERA20C; 20CR; JRA55; NCEP1; MERRA; CFSR; ERAINT; NCEP2. Los ciclones extra-tropicales considerados son los que en su núcleo tienen una presión atmosférica menor o igual que 980 hPa (Tabla 4). Uno de los resultados de la caracterización de los ciclones extra-tropicales es que la tendencia promedio de la densidad e intensidad de los ciclones extra-tropicales es a aumentar:

Estaciones	Densidad (ciclones- $10^6 \text{ km}^{-2}$ )	Intensidad ( $10^{-5} \text{ hPa}\cdot\text{km}^{-2}$ )
EFM	21.4	5.3
AMJ	9.5	6.8
JAS	7.8	0.9
OND	11.8	2.0

Con el fin de relacionar el segundo hallazgo con eventos del campo extremo de oleaje que han ocurrido anteriormente en El Salvador, se analizó el informe sobre el oleaje extremo del tipo mar de leva incrementado que arribo a la costa de El Salvador entre el 2 y 4 de Mayo de 2015, en donde se describe el arribo de olas rápidas (entre 60 y 70 km/hrs) y altas (entre 2.4 y 2.7 m), siendo mayor en Occidente que en Oriente por el efecto sombrilla de la Islas

Galápagos, que refractan y difractan el tren de olas del oleaje proveniente del Sur-suroeste (DOA/MARN. 2015). Uno de los resultados de la caracterización del oleaje extremo es la potencia máxima en secciones de la línea de costa: Planicie Costera Occidental (Acajutla),  $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ; Cordillera del Bálsamo (La Libertad),  $73 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ; Planicie Costera Central (Estero de Jaltepeque),  $59 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ; Planicie Costera Oriental (bahía de Jiquilisco),  $43 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ; Golfo de Fonseca (Bahía de La Unión),  $35 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ , de donde se puede concluir que eventos del campo extremo de oleaje como el de Mayo 2015, se pueden observar con período de retorno de 3 años y probabilidad de ocurrencia de 70%.

## 5. Referencias

- Caires, S. 2011. Extreme value analysis: wave data. JCOMM Technical Report No. 57.
- DOA/MARN. 2015. Informe oleaje extremo del tipo mar de leva incrementado: 2 -4 de mayo de 2015.
- DOA/MARN. 2017. Variabilidad del campo medio del oleaje frente a la costa de El Salvador. <http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/estudios/variabilidad+del+campo+medio+del+oleaje+frente+a+la+costa+de+el+salvador/>.
- Fisher, R.A.; Tippett, L.H.C. 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest and smallest member of a sample. *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 24: 180-190.
- Goda, Y. 1988. On the Methodology of Selecting Design Wave Height. *Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers*, pp 899-913.
- Leder, N., Smircic, A. and Vilibic, I. 1998. Extreme values of surface wave heights in the Northern Adriatic. *GEOFIZIKA*. Volume 15.
- Liu, Z., & Burcharth, H. F. 1998. *Encounter Probability of Significant Wave Height*. Aalborg: Department of Mechanical Engineering, Aalborg University.
- Martucci, G., Carniel, S., Chiggiato, J., Sclavo, M., Lionello, P., Galati, M.B. 2010. Statistical trend analysis and extreme distribution of significant wave height from 1958 to 1999 - An application to the Italian Seas. *Ocean Science*, 6 (2), pp. 525-538.
- Osuna, P. 2010. Implementación y validación del modelo WAM ciclo 4.5 en el Océano Pacífico. Departamento de Oceanografía Física. División de Oceanología. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México.
- Thevasiyani T. Perera K. 2014. Statistical analysis of extreme ocean waves in Galle, Sri Lanka. *Weather and Climate Extremes*. Vol. 5-6. Pp. 40–47. Elsevier.
- Thompson E. F. 2002. *Hydrodynamic Analysis and Design Conditions*. Coastal Engineering Manual: Chapter II-8. Coastal and Hydraulics Laboratory, Engineer Research and Development Center.
- Uppala, S. M., et al. 2005. The ERA-40 re-analysis, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 131, 2961–3012.
- WAM-DI Group. 1988. The WAM model – a Third Generation Ocean Wave Prediction Model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775–1810.
- Wang, X. L., Feng, Y., Chan, R., Isaac, V. 2016. Inter-comparison of extra-tropical cyclone activity in nine reanalysis datasets. *Atmospheric Research* 181. 133–153.

## 6. Figuras

Figura 1. Localizaciones de los nodos del modelo WAM. Nodo 1,  $13^{\circ}$  N –  $90^{\circ}$  W (90 km frente a punta Remedios). Nodo 2,  $13^{\circ}$  N –  $89^{\circ}$  W (60 km frente a la desembocadura del río Lempa. Nodo 3,  $13^{\circ}$  N –  $88^{\circ}$  W (30 km frente a punta Amapala).

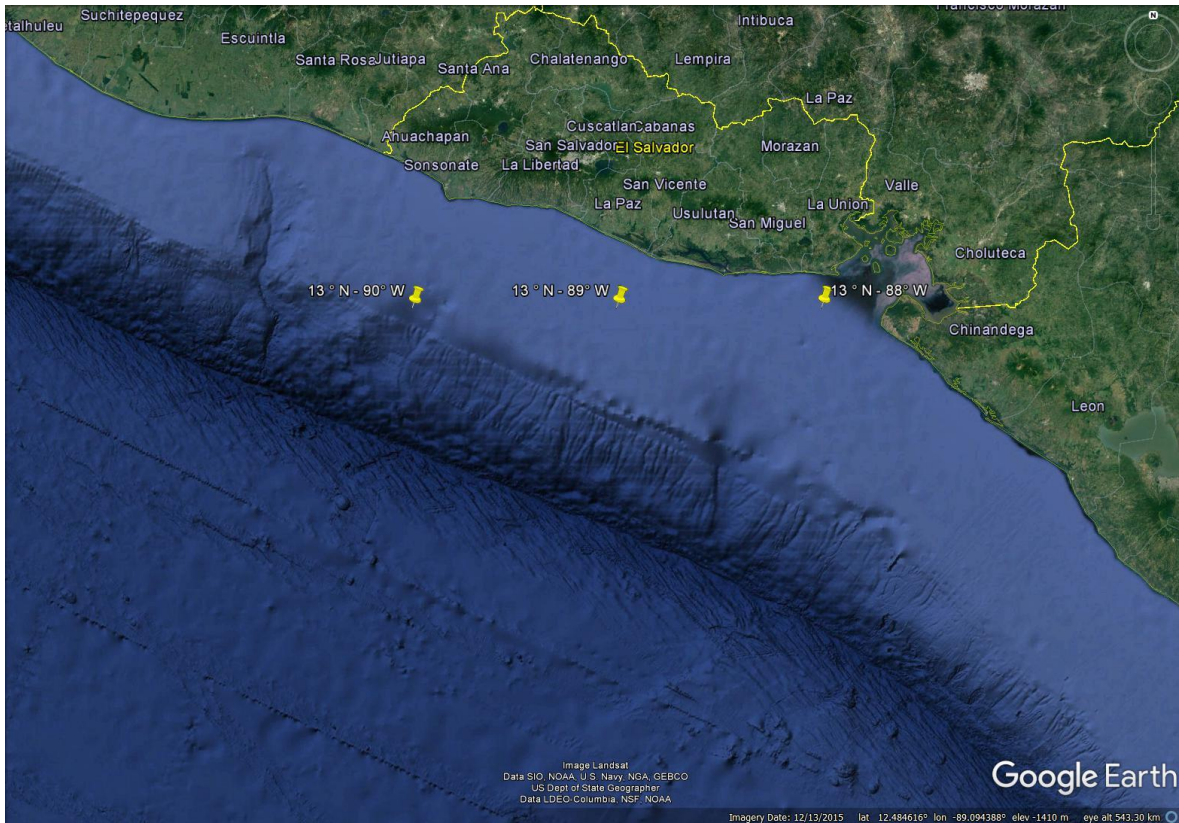
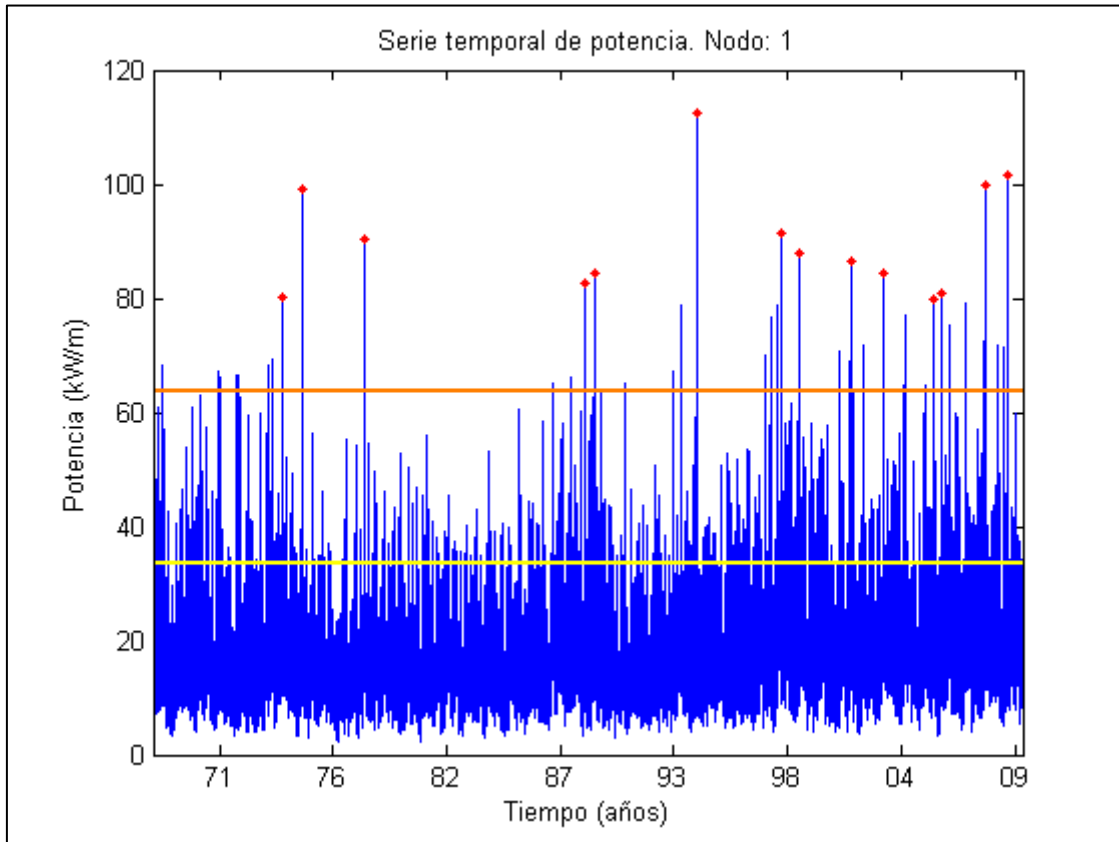
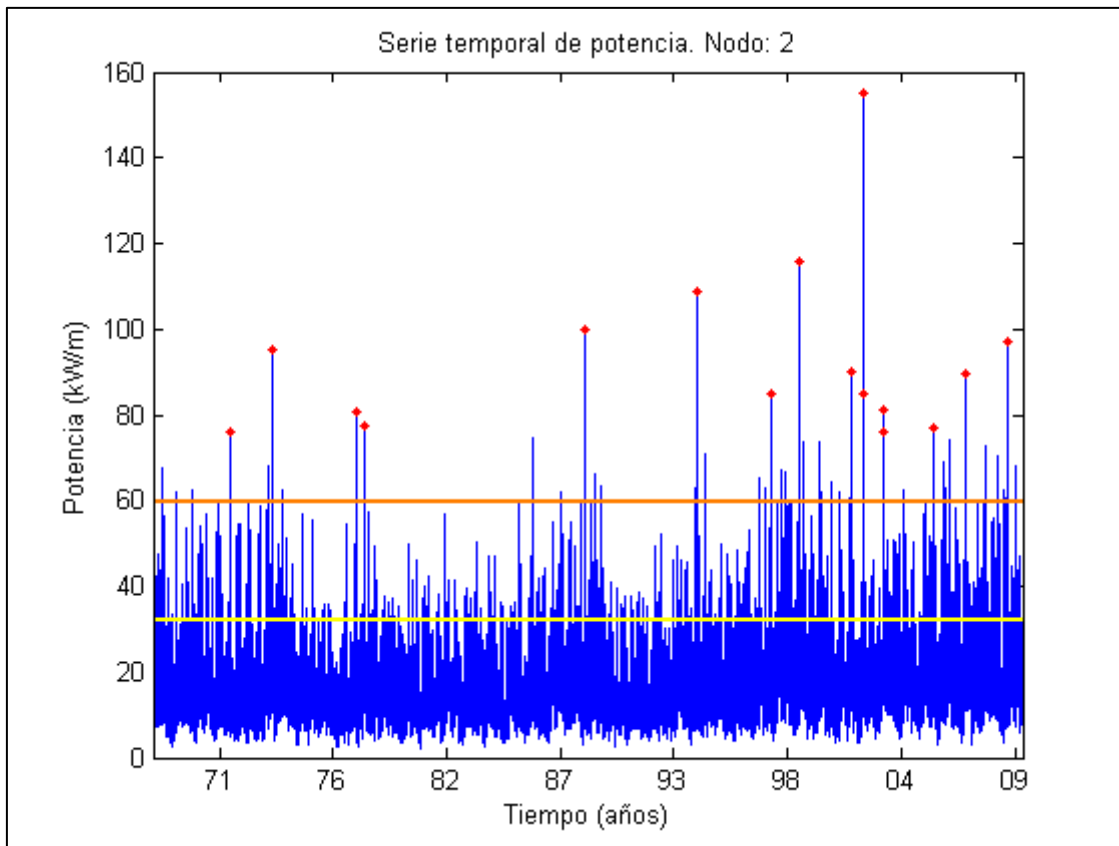


Figura 2. Series temporales de la potencia ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) del oleaje. La línea amarilla indica el percentil 95 ( $32 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ), umbral de impacto bajo, La línea naranja indica el percentil 99.9 ( $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ), umbral de impacto alto. Los puntos rojos indican los eventos extremos, mayores que el percentil 99.99 ( $74 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ).







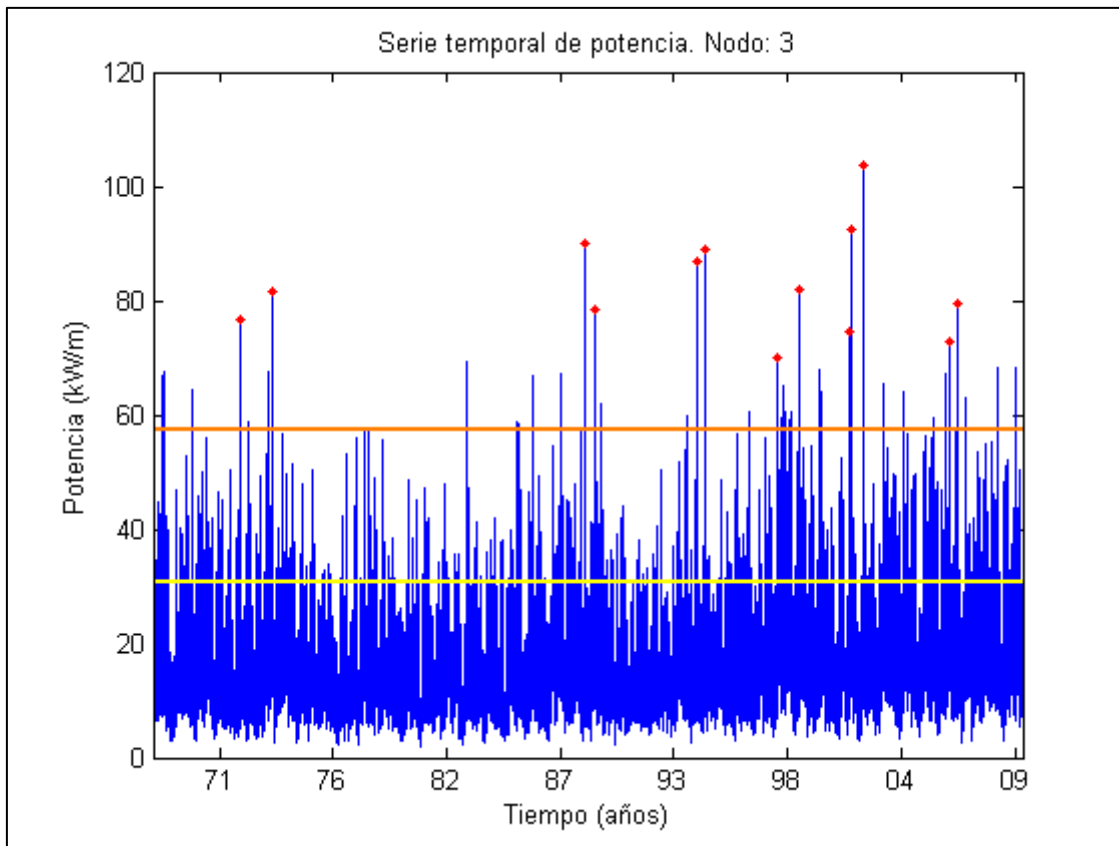
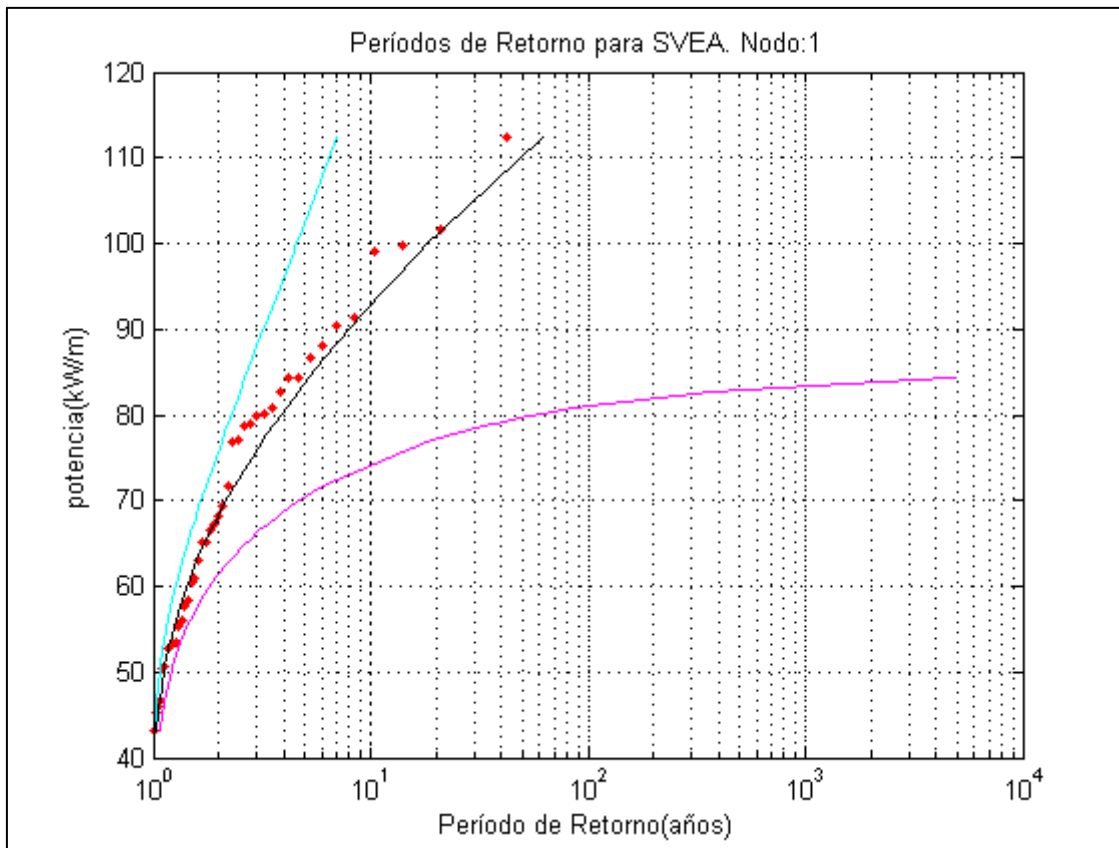
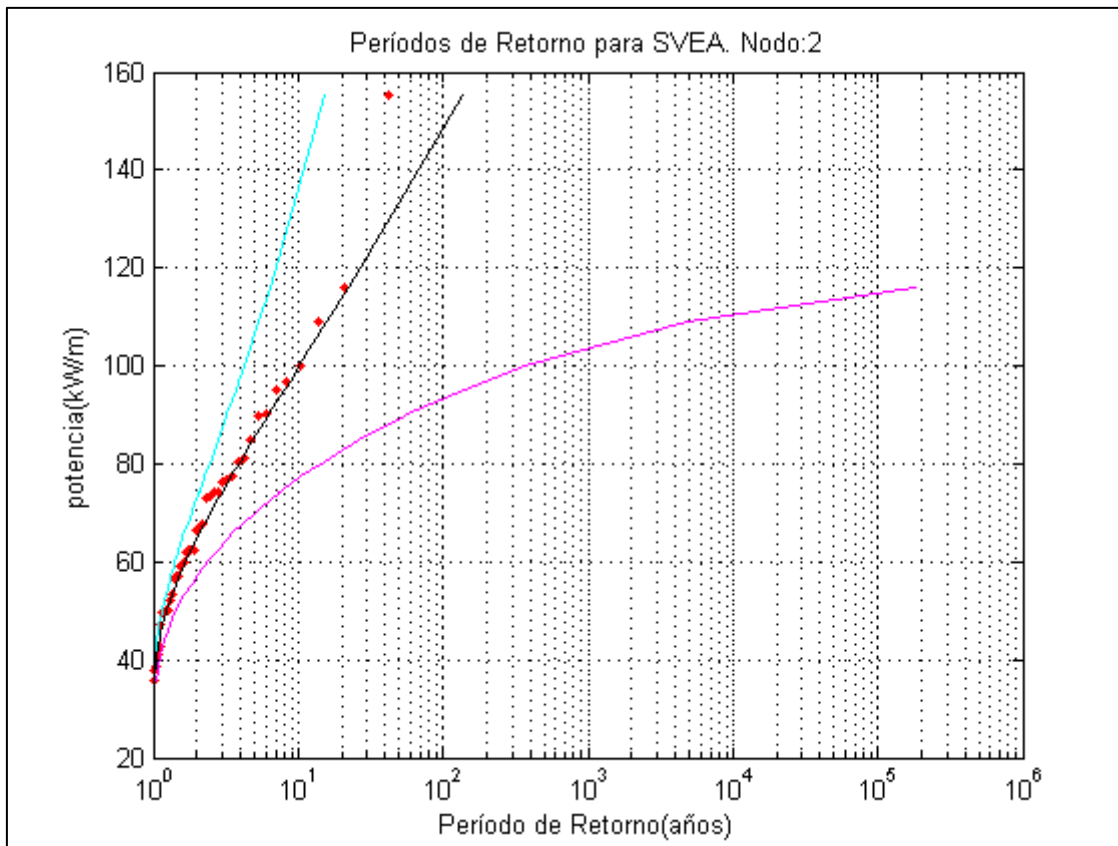


Figura 3. Períodos de retorno (años) para la potencia ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) del oleaje. Los puntos rojos indican la probabilidad de no excedencia de la Serie de Valores Extremos Anuales (SVEA). La línea negra es la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada Generalizada de Valores Extremos (FDP<sub>a</sub>/GVE) ajustada por el Método de Máxima Similitud (MMS). Las líneas cian y magenta indican el límite superior e inferior del intervalo de confianza de 95%.





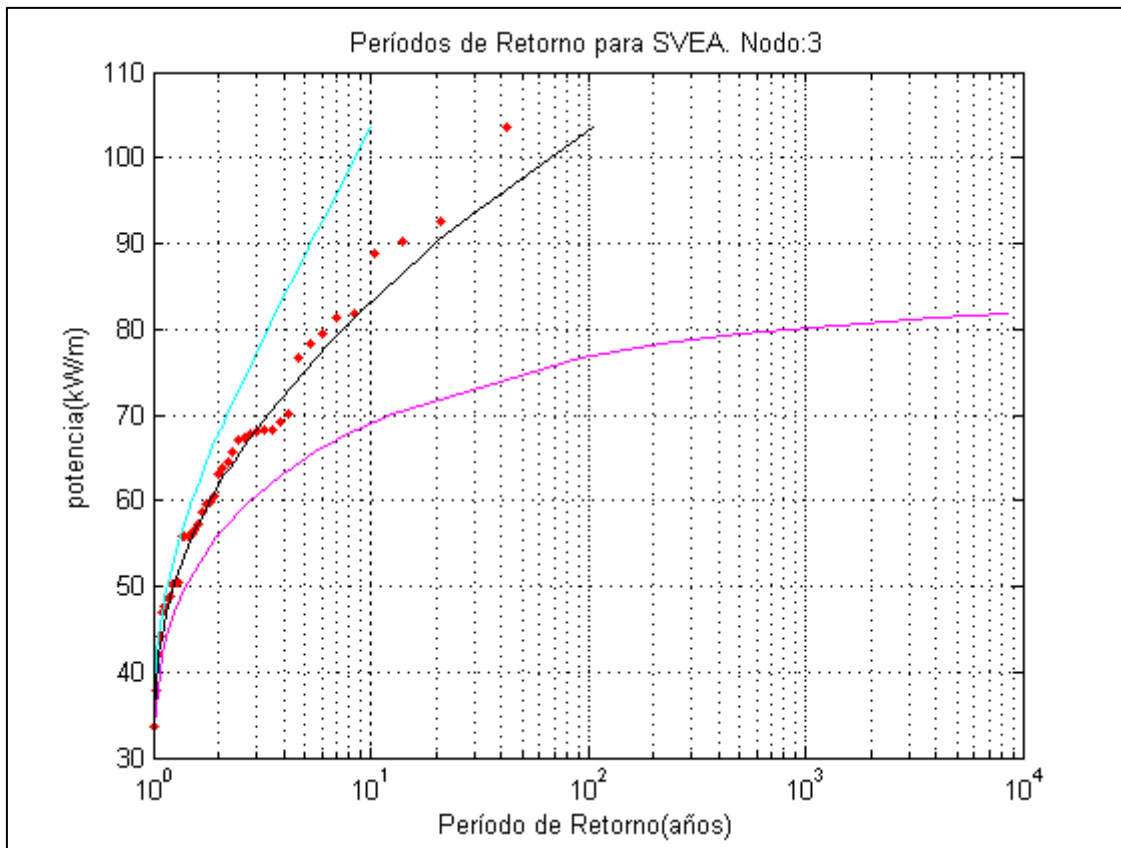
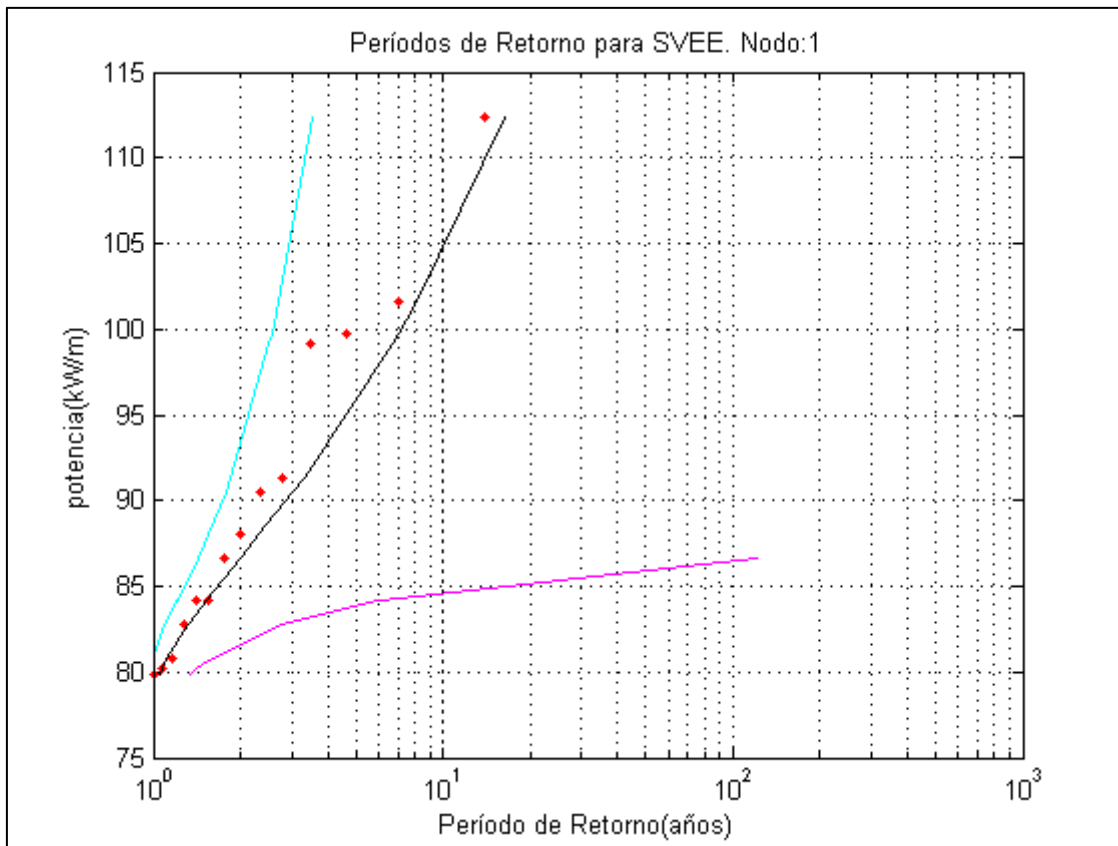
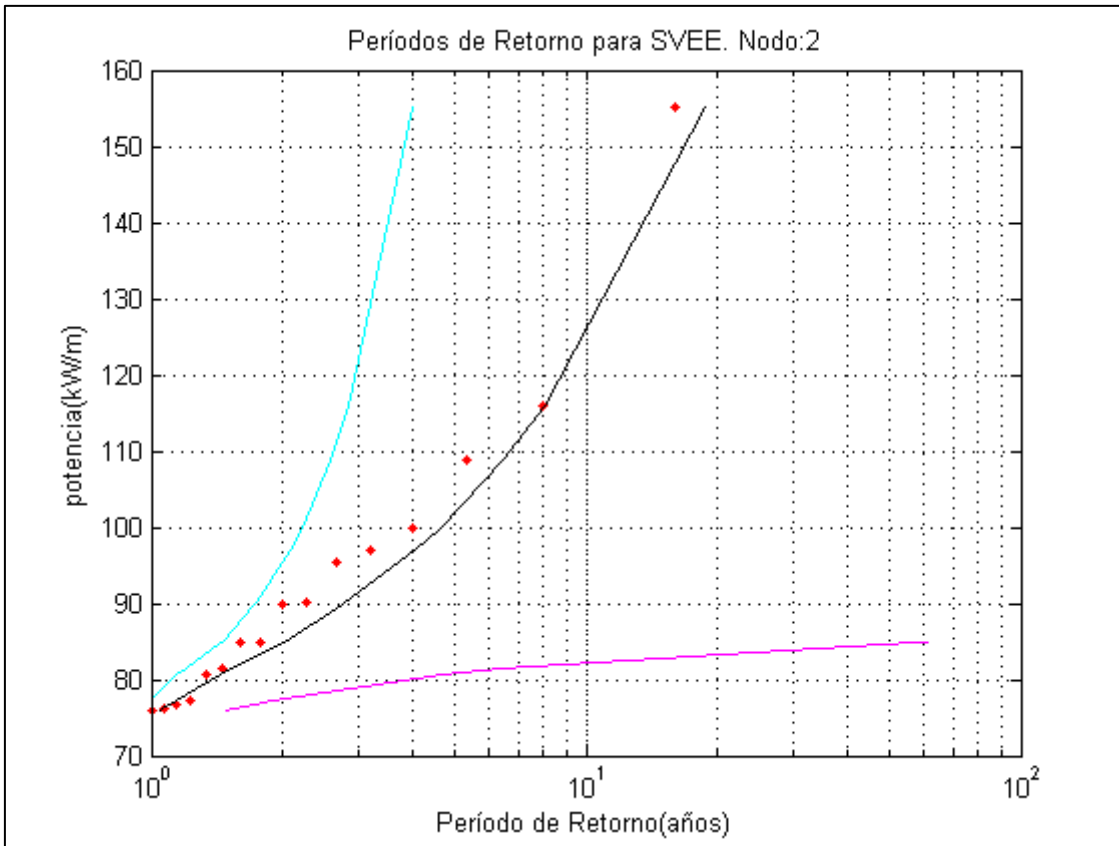
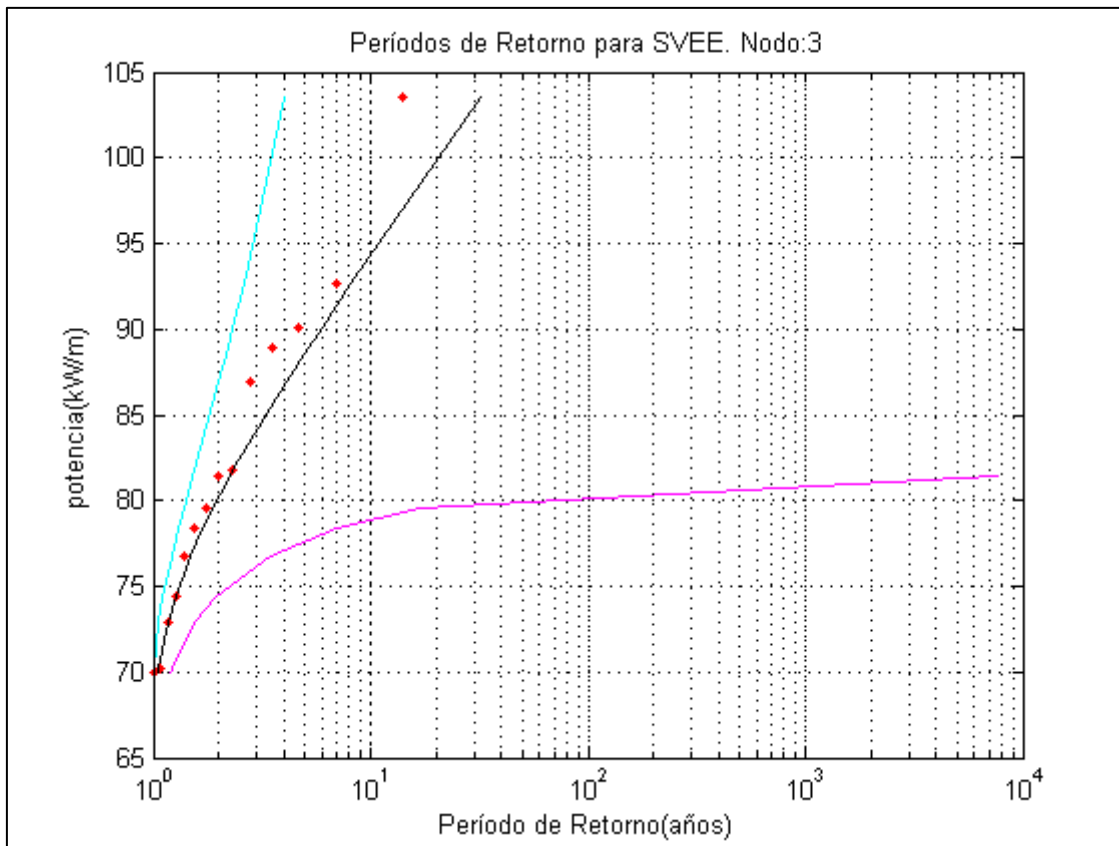


Figura 4. Períodos de retorno (años) para la potencia (kW-m-1) del oleaje. Los puntos rojos indican la probabilidad de no excedencia de la Serie de Valores de Eventos Extremos (SVEE). La línea negra es la Función de Distribución de Probabilidad Acumulada / Generalizada de Valores Extremos (FDPa/GVE) ajustada por el Método de Máxima Similitud (MMS). Las líneas cian y magenta indican el límite superior e inferior del intervalo de confianza de 95%.









## 7. Tablas

Tabla 1. Parámetros de la Función de Distribución de Probabilidad Generalizada de Valores Extremos para: (a) Serie de Valores Extremos Anuales; (b) Serie de Valores de Eventos Extremos.

(a)

Nodo	Localización ( $\alpha$ )	Escala ( $\beta$ )	Forma ( $\gamma$ )
1	62.96	15.18	-0.12
2	58.46	17.25	0.05
3	56.94	13.53	-0.14
Promedio	59.45	15.32	-0.07

(b)

Nodo	Localización ( $\alpha$ )	Escala ( $\beta$ )	Forma ( $\gamma$ )
1	84.53	5.37	0.42
2	81.71	7.53	0.71
3	77.60	7.22	0.02
Promedio	81.28	6.71	0.38

Tabla 2. Umbrales ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) para: (a) Serie de Valores Extremos Anuales; (b) Serie de Valores de Eventos Extremos.

(a)

Nodo	Período de retorno (años)				
	5	10	25	50	100
1	84	93	103	110	117
2	85	100	118	133	148
3	75	83	92	98	103
Promedio	81	92	104	114	123

(b)

Nodo	Períodos de retorno (años)				
	5	10	25	50	100
1	96	105	121	137	159
2	102	124	175	242	352
3	89	94	102	107	113
Promedio	97	108	133	162	208

Tabla 3. Probabilidad de ocurrencia (%) para: (a) Serie de Valores Extremos Anuales; (b) Serie de Valores de Eventos Extremos.

(a)

Período de retorno (años)	Vida útil (años)				
	5	10	25	50	100
5	67	89	100	100	100
10	41	65	93	99	100
25	19	34	64	87	98
50	10	18	40	64	87
100	5	10	22	40	63

(b)

Período de retorno (años)	Vida útil (años)				
	5	10	25	50	100
5	29	50	82	97	100
10	16	29	57	82	97
25	6	13	29	49	74
50	3	6	15	28	49
100	2	3	8	15	28

Tabla 4. Tendencia lineal, extrapolación a 100 años, de las series temporales de densidad e intensidad de ciclones extra-tropicales en el mar del Hemisferio Sur. La tendencia lineal dentro del intervalo de confianza de 95%, está en negrita.

Base de datos	Estaciones	Densidad (ciclones-10 <sup>6</sup> km <sup>-2</sup> )	Intensidad (10 <sup>-5</sup> hPa-km <sup>-2</sup> )
ERA20C	EFM	<b>35.2</b>	<b>7.6</b>
	AMJ	<b>17.0</b>	2.7
	JAS	10.6	-2.4
	OND	<b>20.7</b>	1.7
20CR	EFM	<b>15.4</b>	-0.5
	AMJ	8.9	<b>3.6</b>
	JAS	<b>9.1</b>	2.8
	OND	11.6	2.3
JRA55	EFM	<b>15.4</b>	<b>-8.9</b>
	AMJ	-0.1	-3.2
	JAS	<b>-8.0</b>	<b>-12.4</b>
	OND	4.9	<b>-11.8</b>
NCEP1	EFM	<b>35.1</b>	<b>7.0</b>
	AMJ	<b>27.4</b>	<b>6.8</b>
	JAS	<b>16.0</b>	-3.7
	OND	20.3	1.1
MERRA	EFM	3.7	<b>13.2</b>
	AMJ	8.7	<b>15.4</b>
	JAS	3.4	1.9
	OND	6.7	4.5
CFSR	EFM	<b>23.1</b>	<b>6.3</b>
	AMJ	<b>-15.4</b>	<b>12.3</b>
	JAS	<b>13.9</b>	<b>13.6</b>
	OND	6.8	<b>9.8</b>
ERAINT	EFM	<b>13.7</b>	2.7
	AMJ	<b>12.5</b>	<b>5.1</b>
	JAS	<b>11.1</b>	3.5
	OND	8.6	0.4
NCEP2	EFM	<b>29.6</b>	<b>14.8</b>
	AMJ	<b>17.0</b>	<b>11.3</b>
	JAS	6.1	3.7
	OND	<b>14.8</b>	<b>8.3</b>

## Corolario

Para una mejor comprensión de los conceptos de período de retorno y probabilidad de ocurrencia se presenta la deducción matemática de sus expresiones (Liu and Burcharth. 1998).

Sea:  $P$  la potencia;  $U$  el umbral de potencia;  $F(U)$  la función de distribución de probabilidad acumulada del umbral;  $T$  el número de años;  $N$  el número de eventos extremos;  $\tau = \frac{T}{N}$  el intervalo de tiempo promedio entre eventos del campo extremo.

Si:

$$F(U) = \text{prob}(P \leq U): \text{probabilidad de no excedencia}$$

Entonces:

$$(1 - F(U)) = \text{prob}(P > U): \text{probabilidad de excedencia}$$

El número de eventos del campo extremo mayor que  $U$  es:

$$k = N(1 - F(U)) = \frac{T}{\tau} (1 - F(U))$$

Por lo que el período de retorno, cuando  $P$  será mayor que  $U$  al menos una vez, es:

$$T(k = 1) = T_r = \frac{\tau}{(1 - F(U))}$$

Si:

$$(1 - 1/T_r)^1: \text{probabilidad de no excedencia en el año 1}$$

Entonces:

$$(1 - 1/T_r)^n: \text{probabilidad de no excedencia en el año } n$$

La probabilidad de no excedencia en la vida útil ( $L$ ) de una infraestructura es:

$$\text{prob}(P \leq U) = (1 - 1/T_r)^L$$

Por lo que la probabilidad de ocurrencia, cuando  $P$  será mayor que  $U$  durante  $L$ , es:

$$P_o = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^L$$