

César E. Ortega Estrada, David de León Escobedo  
Análisis del factor de valor presente de los costos esperados de daño por huracán en plataformas marinas  
*Ciencia Ergo Sum*, vol. 10, núm. 2, julio, 2003  
Universidad Autónoma del Estado de México  
México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10410207>



*Ciencia Ergo Sum*,  
ISSN (Versión impresa): 1405-0269  
[ciencia.ergosum@yahoo.com.mx](mailto:ciencia.ergosum@yahoo.com.mx)  
Universidad Autónoma del Estado de México  
México

¿Cómo citar?

Fascículo completo

Más información del artículo

Página de la revista

[www.redalyc.org](http://www.redalyc.org)

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Análisis del factor de valor presente de los costos esperados de daño por huracán en plataformas marinas

César E. Ortega Estrada\* y David de León Escobedo\*\*

Recepción: marzo 14 de 2003

Aceptación: abril 22 de 2003

\* Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Cerro de Coatepec S.N., Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, 50100. Teléfono: (01722) 214 0855

Correo electrónico: ceortega@yahoo.com

\*\* Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas 152, San Bartolo Atepehuacan 07730, México D.F. Teléfono: (0155) 3003 7322

Fax: (0155) 3003 7225

Correo electrónico: dleon@imp.mx

Agradecemos al Conacyt y al Instituto Mexicano del Petróleo el apoyo económico otorgado al primero de los autores para la realización de sus estudios de posgrado. Este artículo es parte del proyecto de tesis doctoral. Adicionalmente, nuestro agradecimiento por la revisión crítica y los comentarios de los árbitros anónimos de esta revista.

**Resumen.** En el proceso de optimización en ingeniería, se requiere estimar los costos esperados asociados a la falla y a la operación.

En este proceso, los costos requieren ser trasladados a valor presente debido a la variación del valor del dinero en el tiempo, para después combinarlos. En este trabajo se estudia el factor de valor presente y sus variables involucradas. Adicionalmente, se presenta la formulación para estimar el valor esperado de los costos asociados a la falla, debidos a huracanes en las plataformas marinas de la sonda de Campeche y se realiza un análisis paramétrico del factor de valor presente.

**Palabras clave:** optimización, valor presente, huracán, plataformas marinas.

**An Analysis of the Estimated Damage Costs to Offshore Structures as a Result of Hurricanes**

**Abstract.** Recently, optimization techniques are being used for the design of new structures and to determine the program of inspection and repair of structures, where the expected failure cost and the expected cost associated with the operation are calculated. In this process, the costs need to be translated to present value because the value of money change with the time. In this work, the present worth of damage cost is estimated and the parameters that define it are analyzed. In addition, the formulation for the expected value of the present worth of the cumulative damage cost due to all future storms in the life of the offshore structure in the bay of Campeche, Mexico is presented, and a parametric analysis is performed.

**Key words:** optimization, present worth, hurricane, offshore platforms.

## Introducción

La empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) cuenta con una infraestructura para la explotación de hidrocarburos en la sonda de Campeche de aproximadamente 200 plataformas marinas fijas y 1,900 km de tubería submarina (figura 1). Con esta infraestructura maneja una producción de crudo de 2.1 millones de barriles por día y una producción de gas de 1,500 millones de pies cúbicos por día, lo que le permite realizar exportaciones por 350 millones de pesos diarios o 0.128 billones de pesos anuales (PEMEX, 2003). En el 2002,

estas exportaciones representaron 2.08% del producto interno bruto nominal, que ascendió a 6.153 billones de pesos (INEGI, 2003). Los volúmenes de producción mencionados ubican a la sonda de Campeche como una de las regiones más importantes a nivel mundial. Es por ello que las estructuras deben tener la confiabilidad suficiente ante condiciones adversas como lo es el paso de huracanes y tormentas de invierno.

Para obtener el nivel de confiabilidad óptimo es necesario realizar un estudio costo-beneficio como el que se ha desarrollado en estudios previos (Faber, 2001 y Ortega y De León, 2003) para obtener el periodo óptimo de inspec-

ción de plataformas marinas. En dicho estudio se requieren estimar los costos esperados por daños estructurales en las plataformas, daño al equipo, derrame de crudo, pérdidas de producción, pérdidas indirectas, y ocasionalmente costos por personal lesionado o pérdida de vidas humanas que pudieran generarse en caso de daño o falla de la plataforma.

En la estimación de los costos asociados a la falla debe considerarse que los huracanes futuros ocurren en distintos tiempos, por lo que los costos que pudieran ocasionarse como consecuencia de los daños que se presenten en esos tiempos son diferentes para cada evento con el mismo nivel de daño. Esto se debe a la variación del valor del dinero en el tiempo. Cada uno de los costos futuros requiere ser expresado en valor presente para uniformizar las cantidades que se pretenden sumar (por ejemplo, costos de inspección y reparación), y así obtener el costo en valor presente del ciclo de vida, a partir de considerar todos los huracanes futuros en diferentes tiempos durante la vida de la plataforma.

Como se mencionó, para obtener el nivel de confiabilidad óptimo se requieren, entre otros datos, los costos esperados asociados a la falla del sistema estructural. En este trabajo se entiende como valor esperado de los costos asociados a la falla, al producto de los costos asociados a la falla en valor presente multiplicados por la probabilidad de que ocurra cada uno de los huracanes considerados durante la vida útil de la estructura. Para estimar el valor esperado en valor presente, es necesario estudiar primero algunos factores, tales como: la tasa de descuento promedio, la tasa media anual de ocurrencia de huracanes y tormentas de invierno, y por último la función de distribución de probabilidad de los tiempos de arribo de huracanes y tormentas de invierno. A continuación se presenta el desarrollo de todos estos aspectos.

### 1. Tasa de descuento promedio

La tasa anual neta de descuento  $q$  se define en este trabajo como la diferencia entre la tasa anual de interés y la tasa anual de inflación. Tanto la tasa de interés como la de inflación anual fueron obtenidas del Banco de México (2003). La tabla 1 muestra el cálculo de la tasa de descuento promedio anual, donde únicamente se ha considerado el periodo 1995-2002 por considerarse relativamente estable.

Figura 1. Ubicación de la sonda de Campeche.

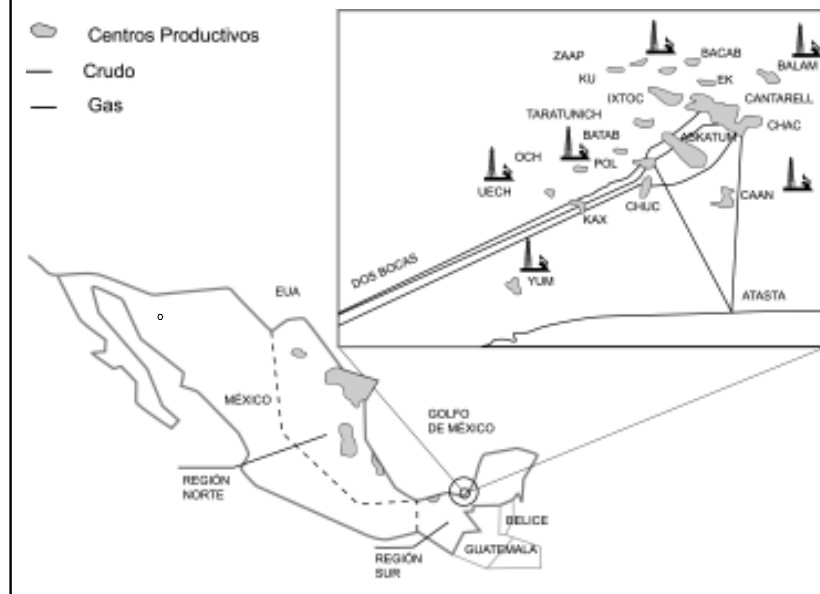


Tabla 1. Tasa de descuento promedio anual.

Año	Tasa de interés*	Tasa de inflación	Tasa de descuento
1995	55.21	39.27	15.94
1996	33.61	35.26	-1.65
1997	21.91	20.82	1.09
1998	26.89	15.90	10.99
1999	24.10	16.67	7.43
2000	16.96	9.51	7.45
2001	12.89	6.39	6.50
2002	8.08	4.92	3.16
Tasa promedio			6.36

\* TIIE a 28 días.

Tabla 2. Tasa de ocurrencia media anual de huracanes y tormentas de invierno en la sonda de Campeche, México.

	Número de casos	Periodo de estudio (años)	Tasa de ocurrencia
Huracanes	14	64.074	0.2185
Tormentas	11	33.077	0.3326

### 2. Tasa de ocurrencia media anual de huracanes y tormentas de invierno

La tasa media anual de ocurrencia  $v$ , se define como la relación del número de huracanes o tormentas de invierno ocurridos en cierta área entre el periodo de tiempo considerado en años. El área de interés está comprendida entre la longitud W 91° a 95° y la latitud N 18° a 20.5°. En esta región se encuentran las instalaciones petroleras de la sonda de Campeche, cuya producción resulta en extremo importante. La tabla 2 resume el cálculo de la tasa media anual de ocurrencia tanto para huracanes como para tormentas

**Tabla 3.** Análisis de bondad de ajuste de los datos observados para huracanes respecto a las distribuciones gamma, lognormal y exponencial.

Punto medio clase	Número observado	Gamma		Lognormal		Exponencial	
		Número esperado	$\frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$	Número esperado	$\frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$	Número esperado	$\frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$
2	7	7.41	0.02	8.11	0.15	7.23	0.01
6	4	2.98	0.35	1.97	2.08	3.21	0.19
10	0	1.37	1.37	0.90	0.90	1.43	1.43
14	1	0.64	0.20	0.52	0.46	0.63	0.21
18	1	0.31	1.56	0.33	1.36	0.28	1.84
22	0	0.15	0.15	0.23	0.23	0.12	0.12
26	0	0.07	0.07	0.16	0.16	0.06	0.06
30	0	0.03	0.03	0.12	0.12	0.02	0.02
34	0	0.02	0.02	0.10	0.10	0.01	0.01
38	0	0.01	0.01	0.08	0.08	0.00	0.00
42	0	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00
		$\chi^2 = 3.78$		$\chi^2 = 5.70$		$\chi^2 = 3.90$	

**Tabla 4.** Análisis de bondad de ajuste de los datos observados para tormentas respecto a las distribuciones gamma, lognormal y exponencial.

Punto medio clase	Número observado	Gamma		Lognormal		Exponencial	
		Número esperado	$\frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$	Número esperado	$\frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$	Número esperado	$\frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$
2	7	7.07	0.00	6.24	0.09	7.02	0.00
6	2	1.92	0.00	1.52	0.15	2.09	0.00
10	1	0.65	0.19	0.70	0.13	0.62	0.23
14	0	0.23	0.23	0.40	0.40	0.19	0.19
18	0	0.08	0.08	0.25	0.25	0.06	0.06
22	0	0.03	0.03	0.17	0.17	0.02	0.02
26	0	0.01	0.01	0.13	0.13	0.00	0.00
30	0	0.00	0.00	0.09	0.09	0.00	0.00
34	0	0.00	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00
38	0	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00
		$\chi^2 = 0.55$		$\chi^2 = 1.56$		$\chi^2 = 0.50$	

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i} \tag{1}$$

donde:

$\chi^2$  = Estadígrafo de bondad de ajuste

$N_i$  = Frecuencia observada

$np_i$  = Frecuencia esperada para la distribución asumida

La *fdp* que mejor se ajusta a los datos observados entre las distribuciones que se ensayan, corresponde a la menor  $\chi^2$ . Los resultados de la tabla 3 muestran que la  $\chi^2$  de la distribución gamma es la mejor *fdp* que se ajusta a los datos observados para huracanes entre las distribuciones gamma, lognormal y exponencial. Los resultados para los tiempos de arribo de tormentas de invierno se muestran en la tabla 4, donde las  $\chi^2$  para la distribución gamma y para la distribución exponencial son del mismo orden. Por lo tanto, se elige la distribución gamma como la *fdp* de los tiempos de arribo tanto para huracanes como para tormentas de invierno.

de invierno. El número de casos y el periodo de estudio referido en la tabla 2 fue obtenido a partir de los datos meteorológicos y oceanográficos de la red de monitoreo de PEMEX (IMP, 2000).

### 3. Función de distribución de probabilidad de los tiempos de arribo para huracanes y tormentas de invierno

La función de distribución de probabilidad *fdp*, de los tiempos de arribo tanto para huracanes como para tormentas de invierno se obtuvo con base en un estudio de bondad de ajuste entre varias distribuciones teóricas respecto a los datos observados (IMP, 2000). Para realizar el análisis de bondad de ajuste se emplea el estadígrafo  $\chi^2$ , según la ecuación 1. En la tabla 3 se presenta el análisis de bondad de ajuste para huracanes y en la tabla 4 para tormentas de invierno, mientras que en la figura 2a se muestra el análisis de bondad de ajuste para huracanes y en la figura 2b para las tormentas de invierno.

### 4. Valor esperado de los costos por daño debido a huracanes futuros

Como los huracanes pueden ocurrir en cualquier tiempo durante la vida futura de la estructura, los costos de daños futuros deberán ser descontados por su respectivo valor presente.

Las siguientes hipótesis son adoptadas para modelar el tiempo de ocurrencia de un número desconocido de huracanes con intensidad incierta durante la vida de la estructura:

a) La ocurrencia de huracanes sigue un proceso de Poisson con una tasa media de ocurrencia  $n$ ;

$$P(N_t = n) = \frac{(v_t)^n}{n!} \exp(-v_t) \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \tag{2}$$

donde:

$v$  = Tasa media anual de ocurrencia de huracanes significantes;

$N_t$  = Número de huracanes en el tiempo  $t$ .

b) Los tiempos de arribo  $T_k$  del  $k$ -ésimo huracán sigue una distribución gamma como anteriormente se discutió (De León, 1996):

$$f_{T_k}(t) = \frac{v(vt)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-vt) \quad \text{para } t \geq 0 \quad (3)$$

c) El valor presente de los costos de daño del  $k$ -ésimo huracán, asumiendo una tasa de descuento promedio  $q$ , es (*ibid.*):

$$C'_d = C_d \left( \frac{1}{1+q} \right)^{t_k} \quad (4)$$

donde:

- $C'_d$  = Costo de los daños en valor presente;
- $C_d$  = Costo de daños en valor futuro (en términos del valor presente de la unidad monetaria empleada);
- $t_k$  = Tiempo de arribo del  $k$ -ésimo huracán.

La ocurrencia de un número de huracanes durante la vida de la estructura requiere ser considerado. El valor presente del costo de daño acumulado debido a  $n$  huracanes futuros en la vida  $L$  de la estructura, puede expresarse como (*ibid.*):

$$C'_d = \sum_{k=1}^n \int_0^L C_d \left( \frac{1}{1+q} \right)^{t_k} f_{T_k|T_k \leq L}(t) dt \quad (5)$$

donde:

$$f_{T_k|T_k \leq L}(t) = \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k, vL)} f_{T_k}(t) \quad (6)$$

La ecuación (6) representa la *fdp* del tiempo de ocurrencia del  $k$ -ésimo huracán. Por último, el costo acumulado de daño esperado en valor presente debido a todos los huracanes futuros en la vida de la estructura  $L$  es (*ibid.*):

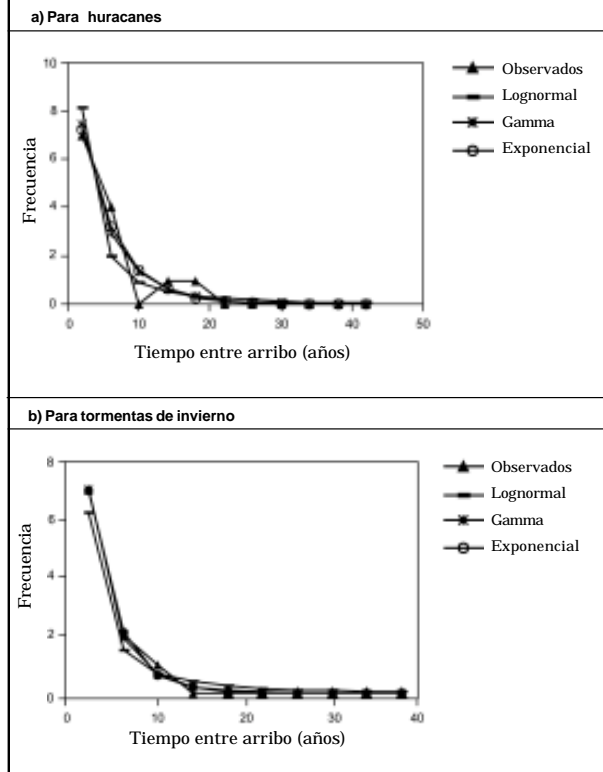
$$E[C'_d] = E[C_d](fvp) \quad (7)$$

$$fvp = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \sum_{k=1}^n \frac{\Gamma(k, \alpha L)}{\Gamma(k, vL)} \left( \frac{v}{\alpha} \right)^k \right] \frac{(vL)^n}{n!} \exp(-vL) \quad (8)$$

donde:

- $\alpha = v + \ln(1+q)$ ;
- $\Gamma(k, \alpha L)$  = Función gamma incompleta;
- $E[C'_d]$  = Costo esperado de daño bajo un huracán futuro (en términos del valor presente del costo de daño);
- $fvp$  = Factor de valor presente.

Figura 2. Análisis de bondad de ajuste de la función de densidad de probabilidades de tiempos de arribo.



En la formulación de la ecuación (7), se asume que la estructura es inmediatamente reparada después de la ocurrencia del huracán que la dañó, y su capacidad original es completamente restablecida.

En la última expresión, la suma interior representa el factor de costo esperado total en valor presente si es que ocurrieran  $n$  huracanes. El término que multiplica a dicha suma toma en cuenta la probabilidad de que en efecto el número de huracanes en el tiempo  $L$  sea  $N = n$ . La suma exterior toma en cuenta todos los posibles valores de  $n$ . Entonces, el *fvp* es, simplemente, el factor que amplifica el valor del dinero en el tiempo e incluye el total acumulado del costo de daños producidos por todos los eventos que pueden causar daño respecto al costo producido por un evento promedio. Por ejemplo, si  $q = 0$  implica que el valor del dinero no cambia con el tiempo y, entonces, el *fvp* es solamente el factor de costo total acumulado que incluye a todos los eventos probables que puedan causar daño durante la vida de la estructura, obteniendo la ecuación 9. Para el caso de  $n = 0.2$ ,  $L = 20$  años,  $fvp = 4.0$ , significa que cada cinco años se presenta un evento ( $v = 0.2$ ), y si la vida de la estructura es de 20 años, se esperan cuatro eventos durante la vida de la misma.

**Tabla 5.** Valores considerados en el análisis paramétrico.

Variable	Valores considerados
$v$	0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 3.0
$q$	0.0, 0.025, 0.5, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4 y 0.5
$L$	5, 10, 20, 35, 50 y 80 años

$$fvp = \sum_{n=1}^{\infty} [n] \frac{(vL)^n}{n!} \exp(-vL) = vL \quad \text{si } q=0 \quad (9)$$

De León (1996) y Montes (2000) obtienen una expresión equivalente a la ecuación (7) para estimar el costo esperado en valor presente de los daños ocasionados por sismos futuros en edificios, ya que las hipótesis para modelar el tiempo de ocurrencia de un número desconocido de sismos con intensidad incierta en la vida de la estructura son las mismas que las que se describieron anteriormente para huracanes. En este trabajo sólo se adaptó la ecuación propuesta por De León (1996) para estimar el costo esperado en valor presente de los daños ocasionados por huracanes futuros en plataformas marinas.

Para calcular la ecuación (8) es necesario estimar  $\Gamma(k, \alpha L)$ , que se define como la función gamma incompleta (Benjamin y Cornell, 1970):

$$\Gamma(k, \alpha L) = \int_0^{\alpha L} e^{-t} t^{(k-1)} dt \quad (10)$$

La solución de la ecuación (10) se realiza por inducción matemática, con lo cual se obtiene la solución exacta, dada por la siguiente ecuación:

$$\Gamma(k, \alpha L) = \int_0^{\alpha L} e^{-t} t^{(k-1)} dt = (k-1)! e^{-(\alpha L)} \left[ e^{(\alpha L)} - \sum_{p=0}^{k-1} \frac{(\alpha L)^p}{p!} \right] \quad (11)$$

**5. Análisis paramétrico del factor de valor presente**

Para conocer el comportamiento de la ecuación (8) se desarrolló un programa donde es posible realizar un análisis paramétrico de dicha ecuación. El factor de valor presente se obtuvo para cada combinación de los casos mostrados en la tabla 5. En todos los casos, el valor de  $n = 50$  se consideró como el número máximo de huracanes en la vida de la plataforma.

Un valor pequeño de  $v$  (por ejemplo,  $v = 0.01$ ) corresponde a eventos cuyo periodo de retorno puede ser superior a las vidas útiles  $L$  consideradas en este estudio, resultando la ocurrencia de muy pocos eventos o ninguno a lo largo de la vida de la estructura. Por otra parte, valores

grandes de  $v$  (por ejemplo, mayores a 1.0), corresponden a una alta frecuencia de eventos pequeños en magnitud que, por lo tanto, podrían no generar daños en la estructura. En el caso de la sonda de Campeche se tienen registrados los valores de  $v = 0.2185$  para huracanes y  $v = 0.3326$  para tormentas de invierno.

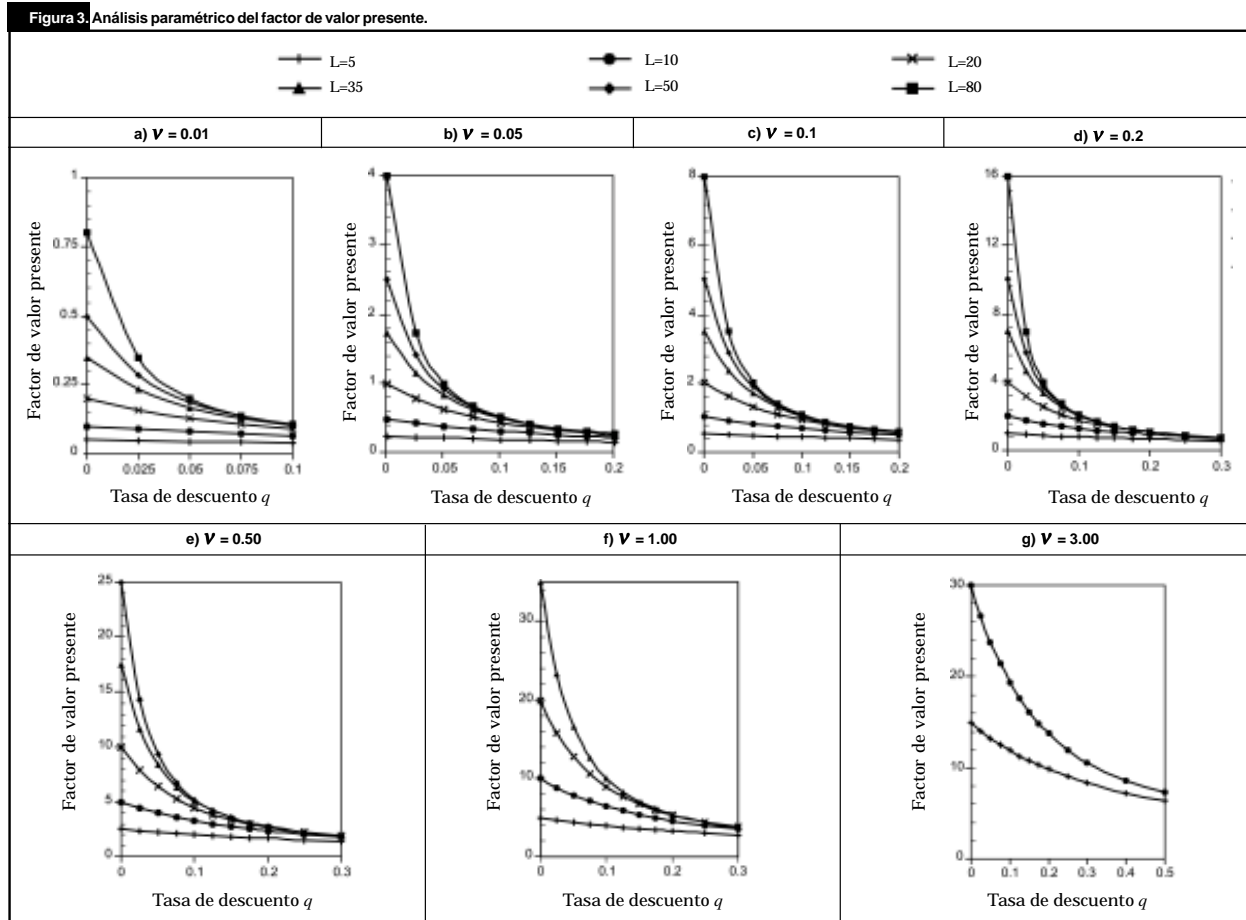
Un valor pequeño de  $q$  (por ejemplo,  $q = 0.025$ ) corresponde a una economía sana, mientras que un valor grande de  $q$  ( $q > 0.20$ , por ejemplo) representa una economía en crisis. El valor de interés para este estudio corresponde a  $q = 0.0636$ . Adicionalmente, las plataformas marinas en la sonda de Campeche se diseñan para una vida útil de 20 años.

Los resultados del análisis paramétrico que se realiza a partir de los datos antes señalados se muestran en la figura 3. De esta figura se desprenden los siguientes comentarios:

- En general, debe observarse que el  $fvp$  aumenta si la tasa media anual de ocurrencia de huracanes o tormentas de invierno  $v$  se incrementa, también el  $fvp$  aumenta si la vida de la plataforma  $L$  se incrementa, pero el  $fvp$  disminuye si la tasa de descuento promedio  $q$  se incrementa.
- De la figura 3a ( $v = 0.01$ ) puede resaltarse que hay poca variación en el  $fvp$ , sobre todo para  $q > 0.05$ , con un  $fvp < 1.0$ . Sin embargo, para valores pequeños de la tasa de descuento  $q$  (por ejemplo, menores a 0.025), la ecuación (8) se vuelve sensible, tomando un amplio rango de valores.
- Para el caso de las figuras 3b, 3c, 3d y 3e ( $v = 0.05$ ,  $v = 0.10$ ,  $v = 0.20$  y  $v = 0.50$ , respectivamente), hay poca variación en el  $fvp$  para los casos de  $L = 80$ , 50 y 35 años, sobre todo cuando la tasa de descuento  $q$  es mayor a 0.05.
- En las figuras 3f y 3g ( $v = 1.0$  y  $v = 3.0$ , respectivamente) se puede observar que para vidas de diseño usuales (por ejemplo, mayores a 20 años), el  $fvp$  es muy alto, para cualquier tasa de descuento estudiada.
- Puede notarse que para tasas de descuento menores que 0.2 la ecuación del  $fvp$  es muy sensible, sobre todo para valores de  $q$  cercanos a cero.

En la tabla 6 se muestra el factor de valor presente para el caso de la sonda de Campeche tanto para huracanes como para tormentas de invierno, considerando una vida de diseño de 20 y 25 años.

Los resultados de la tabla 6 muestran que los  $fvp$  tanto para huracanes como para tormentas de invierno son relativamente altos, en comparación con los resultados obtenidos por De León (1996) para sismos futuros en edificios, donde el  $fvp = 1.73$  para  $v = 0.142/\text{año}$ ,  $L = 50$  años y  $q = 0.08$ . Esto puede explicarse a partir de los comentarios de la figura 3, donde el  $fvp$  aumenta si la  $v$  se incrementa (en este caso se tiene  $v = 0.2185$  para huracanes y  $v = 0.3326$  para tormentas de invierno).



Adicionalmente, se tiene poca variación en el  $f_{vp}$  para vidas de diseño de  $L = 80, 50$  y  $35$  años, sobre todo cuando la tasa de descuento  $q$  es mayor a  $0.05$ .

Los resultados de la tabla 6 repercuten directamente en los trabajos de optimización. Por ejemplo, para el diseño de nuevas estructuras, es necesario obtener la probabilidad de falla óptima (donde los costos totales en la vida  $L$  sean mínimos). Para ello, si el  $f_{vp}$  aumenta, el costo acumulado de daño esperado se incrementa, disminuyendo la probabilidad de falla óptima (es decir, se obtiene una estructura robusta). Por otro lado, si el  $f_{vp}$  disminuye, el costo acumulado de daño esperado también se reduce, aumentando la probabilidad de falla óptima (se obtiene una estructura esbelta). Similarmente, para obtener el periodo óptimo de inspección de plataformas marinas (donde los costos totales en la vida  $L$  sean mínimos), se tiene lo siguiente: si aumenta el  $f_{vp}$ , se obtiene un costo acumulado de daños mayor, reduciendo el intervalo de inspección óptimo (por ejemplo, es preciso inspeccionar cada año); si disminuye el  $f_{vp}$  se obtiene un costo acumulado de daños menor, au-

**Tabla 6.** Factor de valor presente para la sonda de Campeche, tanto para huracanes como para tormentas de invierno.

	Huracanes	Tormentas
$L = 20$ años	2.511	3.822
$L = 25$ años	2.785	4.239

mentando el intervalo de inspección óptimo (por ejemplo, es preciso inspeccionar cada cinco años).

### Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un análisis del factor de valor presente de los costos esperados de daño por huracán o tormentas de invierno en plataformas marinas. Previo al análisis del  $f_{vp}$ , se estudió la tasa de descuento promedio, la tasa media anual de ocurrencia de huracanes y tormentas de invierno, obteniendo valores aplicables para la sonda de Campeche. Adicionalmente, la  $f_{dp}$  de los tiempos de arribo de huracanes y tormentas de invierno se obtuvo con base en un estudio de bondad de ajuste entre varias distribuciones ensayadas respecto de los datos ob-

servados, concluyendo que la distribución gamma puede emplearse como la  $f_{dp}$  de los tiempos de arribo tanto para huracanes como para tormentas de invierno.

Se examinaron las hipótesis para calcular el costo acumulado de daño esperado en valor presente debido a todos los huracanes futuros en la vida de la estructura  $L$ , donde se deduce la ecuación que describe al  $f_{vp}$ . En complemento, se realizó un análisis paramétrico del  $f_{vp}$  donde se observa que el  $f_{vp}$  aumenta si la  $v$  se incrementa, también el  $f_{vp}$  crece si la  $L$  se incrementa, pero el  $f_{vp}$  disminuye si la  $q$  aumenta.

Finalmente se obtuvo el  $f_{vp}$  para la sonda de Campeche, tanto para huracanes como para tormentas de invierno,

Se presenta la formulación para estimar el valor esperado de los costos asociados a la falla, debidos a huracanes en las plataformas marinas de la sonda de Campeche.

concluyendo que una plataforma típica tiene en su vida útil, daños cuyas consecuencias cuestan del orden de 2.8 veces lo que cuestan las consecuencias ante un huracán, y del orden de 4 veces lo que cuestan las consecuencias ante una tormenta de invierno.

Se recomienda continuar los estudios y su calibración hacia la planeación óptima de los programas de inspección y mantenimiento en plataformas marinas de la sonda de Campeche. En el futuro cercano, se espera contar con criterios para caracterizar mejor el comportamiento de las plataformas marinas en la bahía de Campeche, y así incidir en la normatividad y en la práctica del diseño y la evaluación de plataformas marinas.

## Bibliografía

- American Petroleum Institute (1993). "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms -Load and Resistance Factor Design". *API RP 2<sup>2</sup>-LRFD*, First Edition, July, Washington, D.C.
- Banco de México (2003). *Indicadores Económicos Financieros*. Banco de México.
- Benjamin, J. R. y C. A. Cornell (1970). *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*. McGraw Hill Inc., Nueva York.
- De León, D. (1996). *Integrating Socio-Economics in the Development of Criteria for Optimal Aseismic Design of R/C Buildings*. Tesis doctoral, Universidad de California en Irvine, EUA.
- Faber, M. H. (2001). "Reliability Based Inspection Planning of Fatigue Damaged Offshore Platforms", *Memorias del I Simposio Internacional sobre Análisis de Riesgo y Confiabilidad Estructural de Instalaciones Marinas* México, D. F.
- Instituto Mexicano del Petróleo (1999). *Filosofía de inspección y mantenimiento de plataformas marinas fijas localizadas en la sonda de Campeche*, Reporte para PEMEX. México, D.F.
- Instituto Mexicano del Petróleo (2000). "Análisis y evaluación de datos meteorológicos y oceanográficos de la red de monitoreo de PEMEX", Reporte técnico No. FABAD-RT-078-04/00. IMP. México, D.F.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática (2003). *Sistema de Cuentas Nacionales* Febrero, INEGI, México.
- Montes, R. (2000). *Estrategias de mantenimiento óptimo de estructuras instrumentadas en zonas sísmicas*. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Ortega, C. y D. De León (2002). "Análisis de confiabilidad de plataformas marinas, considerando daños por abolladuras, pandeos y corrosión en elementos así como por fatiga en juntas", *Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. Puebla, Puebla, México.
- \_\_\_\_\_ (2003). "Development of a Cost-benefit Model for Inspection of Offshore Jacket Structures in Mexico". Aceptado para presentación en el *XXII Congreso Internacional sobre Ingeniería Costa Fuera e Ingeniería Ártica OMAE (en inglés)*. Junio, Cancún, México.
- Petróleos Mexicanos (2003). "Exportación de petróleo crudo". *Indicadores petroleros*. Sector externo, PEMEX.