



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

OPCIONES CLIMÁTICAS PARA EL SECTOR  
PESQUERO DEL PACÍFICO MEXICANO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Maestro en Ingeniería  
Ingeniería de Sistemas (Optimación Financiera)

P R E S E N T A:

ABRAHAM ALVA VÁZQUEZ

TUTOR:

DR. GUILLERMO SIERRA JUÁREZ

México, 2011





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Resumen

El objetivo principal de este trabajo es proponer un modelo de valuación de opciones climáticas para el Sector Pesquero del Pacífico mexicano, tomando como variable fundamental la temperatura del mar. Este derivado proporcionaría una cobertura contra la caída en la producción pesquera debida a los efectos ocasionados por el fenómeno natural de “El Niño”. Se utilizan los datos históricos de la temperatura del mar de diferentes regiones del Pacífico mexicano (Ensenada, Isla Cedros, Cabo San Lucas, Golfo de México, Puerto Vallarta, Acapulco y Golfo de Tehuantepec) para así proponer un proceso estocástico que describa la evolución de la temperatura del mar. Como la temperatura es un índice no-negociable, se utiliza el precio de riesgo de mercado, el cual es un parámetro importante para el cálculo de los precios de los contratos de opciones climáticas dentro de un mercado de derivados incompleto. Se presenta la aplicación del modelo para la industria en algunas regiones del Sector Pesquero del Pacífico mexicano haciendo uso del método de simulación Monte Carlo. Además, se muestran las especificaciones que deberían tener algunos contratos de opciones climáticas, así como también ejemplos numéricos de precios para estos contratos.

*Palabras Claves:* Opciones Climáticas, Ecuación Black-Scholes, derivados

# Índice

<b>Introducción</b>	9
<b>1 El Fenómeno de El Niño y la Pesca en México</b>	12
1.1 El Fenómeno de El Niño . . . . .	12
1.2 Medición de El Niño . . . . .	13
1.3 Los Efectos de El Niño en el Pacífico Mexicano . . . . .	14
1.4 El Sector Pesquero en México . . . . .	15
1.4.1 El Niño y las pesquerías en México . . . . .	17
Conclusión capitular . . . . .	20
<b>2 Opciones</b>	21
2.1 Tipos de Opciones . . . . .	21
2.1.1 Opciones Call . . . . .	22
2.1.2 Opciones Put . . . . .	23
2.2 Posiciones en la Opción . . . . .	25
2.3 Valuación de Opciones . . . . .	26
2.3.1 Modelo de Black-Scholes . . . . .	27
2.3.2 Modelo de Simulación Monte Carlo . . . . .	28
2.3.3 Modelo Binomial. . . . .	31
2.4 Opciones Exóticas . . . . .	34
Conclusión capitular . . . . .	36
<b>3 Derivados Climáticos</b>	37
3.1 Definición . . . . .	37
3.2 El Mercado de Derivados Climáticos . . . . .	38
3.3 Índices Degree-Days . . . . .	38
3.4 Opciones Climáticas . . . . .	40
3.4.1 El Pago Máximo . . . . .	41

3.5	Derivados Climáticos y Contratos de Seguros . . . . .	41
3.6	Ejemplos de cobertura climática . . . . .	42
	Conclusión capitular . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Modelación de la Temperatura del mar del Pacífico Mexicano</b>	<b>44</b>
4.1	Modelo Determinista para la Temperatura del Mar . . . . .	45
4.1.1	Probando el Modelo a los Datos . . . . .	46
4.2	Dinámica estocástica de las Variaciones de la Temperatura . . . . .	47
4.2.1	Estimadores de $\sigma$ . . . . .	49
4.2.2	Estimador del parámetro de reversión a la media . . . . .	49
4.2.3	Estimaciones de los parámetros $\sigma$ y reversión a la media . . . . .	50
4.3	Simulación de trayectorias de la Temperatura del mar . . . . .	52
	Conclusión capitular . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Cálculo del Precio del Derivado Climático</b>	<b>54</b>
5.1	El Precio de riesgo de mercado . . . . .	54
5.2	Aplicación del Modelo al Sector Pesquero . . . . .	55
5.2.1	Temperatura de Referencia . . . . .	56
5.2.2	El Nominal . . . . .	56
5.2.3	Especificaciones de los contratos . . . . .	58
5.3	Resultados y Discusión . . . . .	59
	Conclusión capitular . . . . .	60
	<b>Conclusiones</b>	<b>61</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>
	<b>Apéndice 1</b>	<b>67</b>

# Índice de Figuras

1.1	Anomalías de la temperatura de la superficie del mar ( $^{\circ}\text{C}$ ) en agosto de 1997, Tomado de Magaña (2004). . . . .	13
1.2	Arreglo de boyas para la atmósfera y el océano tropical en el Pacífico, así como regiones de El Niño. . . . .	14
1.3	Características geográficas de las aguas continentales de México. Tomado de Cienfuentes, Torres y Frías (2003). . . . .	16
2.1	Utilidad de la compra de una opción call Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$5 pesos y precio de ejercicio = \$100 pesos. Tomado de Hull (2006) . .	22
2.2	Utilidad de la venta de una opción call Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$5 pesos y precio de ejercicio = \$100 pesos. Tomado de Hull (2006). . .	23
2.3	Utilidad de la compra de una opción put Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$7 pesos y precio de ejercicio = \$70 pesos. Tomado de Hull (2006) . . .	24
2.4	Utilidad de la venta de una opción put Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$7 pesos y precio de ejercicio = \$70 pesos. Tomado de Hull (2006). . .	24
2.5	Pagos de la diferentes posiciones en las opciones Europeas: (a) call largo; (b) call corto; (c) put largo; (d) put corto. Precio de ejercicio = $K$ y precio del activo en la madurez = $S_T$ . Tomado de Hull (2006) . . . . .	26
2.6	La parte sombreada representa a $N(x)$ . . . . .	29
2.7	Método Ziggurat. Tomado de Moler (2004) . . . . .	30
2.8	Evolución del activo subyacente según el proceso binomial multiplicativo en $n$ períodos. . . . .	33
2.9	Evolución del valor de una opción de compra según el proceso binomial multiplicativo en $n$ períodos del subyacente. . . . .	33
2.10	Recopilación de las opciones exóticas más comunes que se negocian tanto en el mercado OTC como también en los mercados organizados. Esquema tomado de García, Sancha, Tejero y Toscano (2000). . . . .	35

3.1	El pago de una opción call HDD con un pago máximo. Tomado de Alaton, Djehiche y Stillberger (2002). . . . .	41
4.1	Localización de las regiones de las cuales se obtuvieron los datos. . . . .	44
4.2	Temperaturas promedio semanal de la región del Golfo de California, 1981-2010. Las gráficas de las temperaturas para las regiones restantes se encuentran en el Apéndice 1.1. Datos obtenidos de IRI/LDEO (2010) y Reynolds, Rayner, Smith, Stokes y Wang (2002). . . . .	45
4.3	Temperatura promedio (4.8) y datos de las temperaturas de la región del Golfo de California, 1981-2010. Las gráficas de la temperatura promedio y datos de las temperaturas para las regiones restantes se encuentran en el Apéndice 1.2. . . . .	47
4.4	Histograma de las diferencias de temperaturas promedio semanal para la región del Golfo de California. El histograma de la diferencias de temperatura promedio semanal de las regiones restantes se pueden observar en el Apéndice 1.3. . . . .	47
4.5	Anomalías (ruido) que se presentan en la temperatura en las diferentes regiones del Pacífico mexicano obtenidas a partir del residual entre los datos de temperatura y el modelo determinista. Las flechas indican eventos del fenómeno de El Niño. Datos obtenidos de IRI/LDEO (2010). . . . .	51
4.6	Una trayectoria del proceso de Ornstein-Uhlenbeck de la región del Golfo de California que sera usada para modelar la temperatura. . . . .	52
5.1	Volumen de producción anual en peso vivo de la pesquería de Sardina en litoral del Pacífico. Las flechas indican eventos del fenómeno de El Niño que se han presentado. Datos obtenidos de SAGARPA (1984-2008). . . . .	57
5.2	Gráfica de regresión lineal de la variación del volumen de producción anual en peso vivo de la pesquería de Sardina contra la temperatura del mar del Pacífico mexicano para el período de 1984-2008. Datos obtenidos de SAGARPA (1984-2008), Reynolds, Rayner, Smith, Stokes y Wang (2002) y IRI/LDEO (2010). . . . .	57

# Índice de Tablas

1.1	Volúmenes de producción pesquera total y por especie en el 2008 en miles de toneladas (Ton) de los estados con mayor participación en la producción nacional; SAGARPA (2008). . . . .	17
1.2	Valor de la producción pesquera total y por especie en el 2008 en miles de pesos (MX\$) de los estados con mayor participación en la producción nacional; SAGARPA (2008). . . . .	17
1.3	Variaciones de la producción de las principales pesquerías del Pacífico mexicano, 1996-98 (peso vivo). Precios tomados a precios en playa de 1997 y dólares (US\$); SAGARPA (1996, 1997, 1998). . . . .	19
1.4	Variaciones en la exportación de productos pesqueros en México, 1996-98. Valores en toneladas y miles de dólares; SAGARPA (1996, 1997, 1998). <sup>1</sup> Incluye descargas en puertos extranjeros. <sup>2</sup> Incluye volumen y valor de abulón enlatado. . . . .	19
4.1	Valores numéricos estimados de los parámetros de la ecuación (4.1) para las diferentes regiones de estudio. . . . .	46
4.2	Estimaciones de $\sigma$ para la región del Golfo de California, obtenidas de la variación cuadrática (4.13) y de la ecuación de regresión (4.14), y el promedio de las dos. . . . .	50
4.3	Valores promedio de $\sigma$ de las diferentes regiones de estudio del Pacífico mexicano, donde ENS = Ensenada, IC = Isla Cedros, GC = Golfo de California, CSL = Cabo San Lucas, PV = Puerto Vallarta, AC = Acapulco y GT = Golfo de Tehuantepec. . . . .	50
4.4	Parámetros de reversión a la media $a$ estimados a partir de (4.15) para las diferentes regiones de estudio. . . . .	51
5.1	Parámetros obtenidos a partir del análisis de regresión lineal. $Y$ representa el vector de la serie de producción y $X$ es el vector de la serie de temperaturas de la región del Golfo de California. . . . .	57
5.2	Especificaciones de tres opciones call HDW para la pesquería de Sardina. MX\$ = pesos mexicanos. . . . .	58



5.3 Precio a valor presente (en millones de pesos) de las opciones climáticas mostradas en la Tabla 5.2. . . . .	59
--	----

# Introducción

Debido a su situación geográfica, una gran variedad de fenómenos naturales ocurren cada año en México, tales cambios pueden ser causa de desastres como terremotos, huracanes, inundaciones y sequías. En el caso de desastres los efectos sobre los recursos naturales y financieros son grandes y no previsible.

Si bien el tema de la variabilidad climática ha llamado la atención del público en el mundo durante algún tiempo, el fenómeno de El Niño ha sido el evento que más interés ha recibido en diversos sectores de la sociedad mexicana. Una de las actividades económicas que resulta ser afectada por un aumento en la temperatura del mar ocasionado por El Niño, es sin duda la pesca. Por ejemplo, el fenómeno de El Niño de mayor impacto en términos monetarios que se ha registrado hasta ahora ha sido el evento de 1997-1998, debido a que sus efectos significaron una pérdida de aproximadamente \$700 millones de pesos durante 1998, cifra que representa los volúmenes de pesca que dejaron de capturar las embarcaciones costeras, además de que en el Golfo de California se dio un cambio radical en la distribución de la población de calamar, que resultó en capturas prácticamente nulas, ocasionando la pérdida de unos 3,200 empleos directos. Para el caso de México los cambios en la temperatura del mar del Pacífico significan graves pérdidas por ser estos litorales los que aportan la mayor parte de la producción de pesca nacional en términos de volumen y de valor de producción.

El clima ha tenido un enorme impacto sobre muchos tipos de actividades financieras. La lista de negocios sujetos al riesgo climático es grande y se incluye, por ejemplo, productores y consumidores en energía, cadenas de supermercados, industrias en diversión y recreación e industrias agrícolas y pesqueras. El comercio de los derivados climáticos para estas compañías ha disminuido su riesgo dentro del mercado ante la presencia de un “mal” clima. Los derivados climáticos son contratos financieros con pagos que dependen del clima de alguna forma. Los índices fundamentales pueden ser por ejemplo la temperatura, la humedad, la lluvia o la nieve.

La primera transacción en el mercado de derivados climáticos tomó lugar en los Estados Unidos en 1997. Desde entonces se han realizado diferentes modelos para la valuación de los derivados climáticos, los cuales son usualmente estructurados como swaps, futuros y opciones de compra y de venta, basados sobre diferentes índices climáticos. Por ejemplo, uno de los modelos para la valuación de estos contratos es el presentado por Alaton, Djehiche y Stillberger (2002) y del cual esta tesis basa su trabajo, además de la importancia que tiene el artículo sobre diferentes

trabajos en derivados climáticos en los que se toma como índice fundamental la temperatura. Algunos de los artículos son los presentados por Jewson (2004), Richards, Manfredo y Sanders (2004), Benth y Šaltytė-Benth (2005) y (2007), Zapranis y Alexandridis (2008), Benth, Härdle y Cabrera (2009), entre otros. En México, desafortunadamente aún no existe un mercado de derivados climáticos, aunque sí hay diferentes trabajos sobre instrumentos financieros en relación al clima y otros fenómenos naturales que ocurren en México, como los presentados por Díaz y Venegas (2001), Trujillo y Navarro (2002), Ibarra (2003), López (2003) y (2006), Fernández y Gregorio (2005), Baqueiro y Sinha (2005), por mencionar algunos.

La hipótesis de este trabajo es proporcionar un derivado para la cobertura contra la caída en la producción pesquera debida al aumento en la temperatura del mar ocasionada por el fenómeno natural de El Niño. El propósito general es proponer un modelo de valuación de opciones climáticas para el Sector Pesquero del Pacífico mexicano, tomando como variable fundamental la temperatura del mar. En particular se espera que usando datos históricos de la temperatura del mar en México se pueda sugerir un proceso estocástico que modele la evolución de la temperatura como un subyacente. A partir del modelo sugerido se espera encontrar una valuación de opciones climáticas en las que la temperatura del mar supere cierto umbral, para así poder plantear un sistema de cobertura. Además, también se plantea aplicar el modelo a un caso práctico, en particular al Sector Pesquero del Pacífico mexicano.

Esta tesis está organizada como sigue:

El capítulo 1 presenta una introducción acerca del fenómeno de El Niño, sus características y comportamiento, como es que afecta al Pacífico Mexicano y los impactos financieros que ha ocasionado dentro del sector pesquero.

En el capítulo 2 se repasa la definición de opción, los tipos de opciones básicas que se pueden encontrar en el mercado y como es que se calcula el precio de estas opciones.

En el capítulo 3 se describe la definición de un derivado climático, incluyendo una corta revisión del mercado de derivados climáticos, los índices climáticos que se utilizan para calcular su precio y en particular para el de una opción climática, y también se menciona una comparación de los contratos de derivados climáticos con los contratos de seguros.

El capítulo 4 se enfoca en encontrar un proceso estocástico que describa la evolución de la temperatura. Se encuentra que un proceso de Ornstein-Uhlenbeck es apropiado de acuerdo con Alaton, Djehiche y Stillberger (2002). También, los parámetros desconocidos dentro del modelo son estimados usando datos históricos de la temperatura del mar. Así, teniendo solamente observaciones discretas, la estimación de algunos parámetros en el modelo está basado en el uso de funciones de estimación martingala, propuesto por Bibby y Sørensen (1995).

Finalmente, a partir de lo obtenido en el capítulo anterior, en el capítulo 5 se presenta el cálculo del precio de los contratos de las opciones tomando la temperatura como índice y la aplicación del modelo a un caso práctico (el sector pesquero del Pacífico mexicano), dando un ejemplo numérico del precio de algún contrato usando simulación Monte Carlo y datos de la SAGARPA

(2008) y SEMARNAT (2009).

En la última parte del trabajo se presentan las conclusiones.

# 1 El Fenómeno de El Niño y la Pesca en México

Durante mucho tiempo, uno de los grandes retos científicos ha sido el entender las variaciones climáticas que se producen año con año para poder predecirlas. En las últimas tres décadas, se ha encontrado que gran parte de dichas fluctuaciones está altamente relacionada con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur; Díaz y Markgraf (1992). Durante el resto del trabajo nos referiremos a este fenómeno como El Niño.

Varias han sido las denominaciones usadas para describir el calentamiento que experimentan los mares del Pacífico tropical del este. El término El Niño, el más aceptado, fue originalmente utilizado para caracterizar una corriente marina cálida del sur a lo largo de las costas de Perú y Ecuador, que se establece al aproximarse el periodo navideño; de ahí el nombre, asociado a El Niño Jesús. El calentamiento en las aguas de la costa del Pacífico sudamericano pronto fue relacionado con el calentamiento anómalo del Pacífico central y del este, a lo largo del ecuador (Figura 1.1), extendiéndose desde la línea internacional del tiempo ( $180^{\circ}\text{W}$ ) hasta la costa sudamericana, resultando en graves alteraciones en el clima global y los ecosistemas; Magaña (2004).

## 1.1 El Fenómeno de El Niño

El Niño corresponde al estado climático en el que la temperatura de la superficie del mar está  $0.5^{\circ}\text{C}$  o más, por encima de la media del período 1950-1979, por al menos seis meses consecutivos, en la región conocida como “Niño 3” ( $4^{\circ}\text{N}$ - $4^{\circ}\text{S}$ ,  $150^{\circ}\text{W}$ - $90^{\circ}\text{W}$ ); Trenberth (1997). (Figura 1.2). Se debe decir que la ocurrencia de El Niño no es periódica, en otras palabras, no ocurre un evento de este tipo cada cierto número de años, generalmente ocurre cada tres a siete años y tiene una duración de 12 a 18 meses; McPhaden (2002).

Las señales de la ocurrencia del fenómeno El Niño no sólo se limitan a las regiones tropicales del océano Pacífico, sino que afectan lugares tan distantes como Norteamérica o Sudáfrica; Ropelewsky y Halpert, (1989). En México el fenómeno El Niño tiene serias repercusiones. De

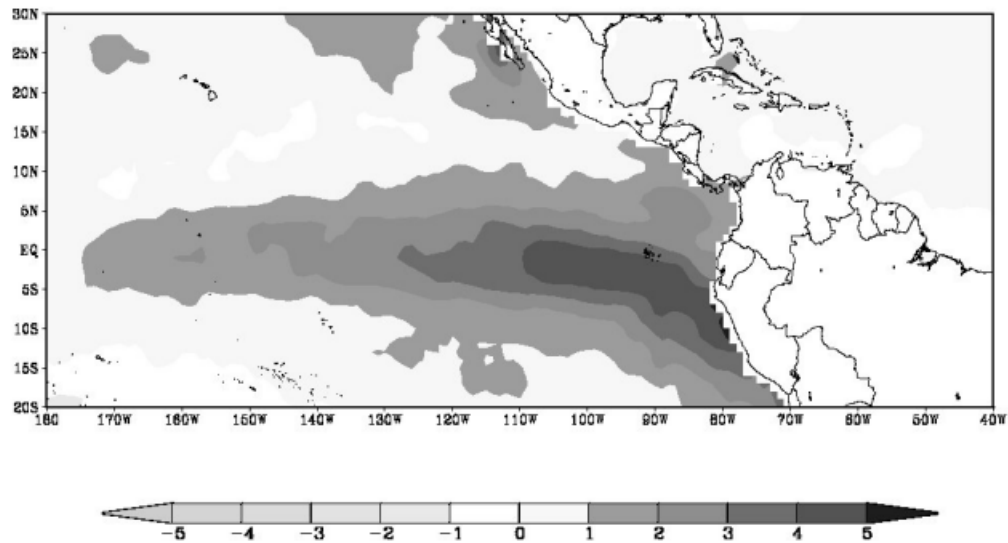


Figura 1.1: Anomalías de la temperatura de la superficie del mar ( $^{\circ}\text{C}$ ) en agosto de 1997, Tomado de Magaña (2004).

manera general podemos decir que las lluvias de invierno se intensifican y las de verano se debilitan. En la zona centro y norte del país se incrementan los frentes fríos en invierno, en tanto que en verano aparece la sequía y disminuyen el número de huracanes en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México; Magaña (1998). Pero son muchas más las formas en que El Niño afecta a México y trae como consecuencias pérdidas económicas dentro del país, como por ejemplo en la industria agrícola y pesquera, entre otras.

## 1.2 Medición de El Niño

En predicciones del clima se habla de anomalías en lluvias o temperatura, o sea, de valores por encima o debajo de la media; Magaña (1998). El estudio físico de las anomalías climáticas, ha llevado a implementar campañas de observación mediante las cuales los datos medidos y los modelos matemáticos son comparados. Hoy se cuenta con redes de observación como la del sistema Océano-Atmósfera Tropical (TAO, por sus siglas en inglés), integrado por 70 boyas ancladas y distribuidas en el Pacífico ecuatorial (Figura 1.2), que constituye el principal sistema de advertencia en el mundo, en cuanto se refiere a los cambios climáticos en el océano tropical. Estas boyas han aportado en años recientes información completa en tiempo y espacio sobre las anomalías de vientos, temperatura superficial del mar y cambios de la termoclina que caracterizan a El Niño.

El uso de los satélites continúa siendo un recurso de gran valía en el monitoreo de sistemas convectivos intensos (como huracanes, ciclones de latitudes medias, etc.). Por ejemplo, el satélite TOPEX/Poseidon, de una misión franco-estadounidense, que fue puesto en órbita en 1992 a una

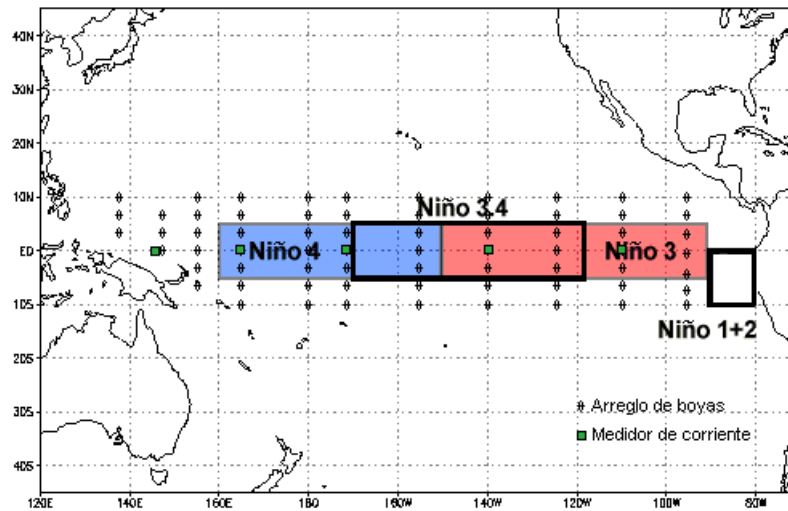


Figura 1.2: Arreglo de boyas para la atmósfera y el océano tropical en el Pacífico, así como regiones de El Niño.

altitud de 1,336 km, mide el aumento del nivel de la superficie del mar y transmite información acerca de la circulación oceánica, resultando entre otras cosas El Niño; Magaña (2004).

### 1.3 Los Efectos de El Niño en el Pacífico Mexicano

El impacto de El Niño en los mares mexicanos parece ser más claro en el Pacífico. Las interacciones de esta región con el Pacífico ecuatorial del este, donde es máxima la señal de El Niño, resulta en cambios en la estructura y dinámica de los mares mexicanos, que alteran el clima y las actividades pesqueras regionales. Las alteraciones en la actividad de la Zona Inter Tropical de Convergencia (ZITC) en el Pacífico Mexicano pueden incluso sentirse en el Caribe sin embargo, la amplitud de la señal en esta región es mucho menor que en el Pacífico nororiental.

El Pacífico Mexicano se extiende desde la entrada del Golfo de California hasta la frontera sur de México, donde comienza el Pacífico Tropical Oriental Centroamericano. Desde Baja California hasta Chiapas el comportamiento de las corrientes oceánicas dependen en gran medida de las temperaturas superficiales del océano, los flujos de humedad hacia la atmósfera y consecuentemente del clima costero. Los mares mexicanos tienen un ciclo anual que puede variar interanualmente. Así, en ocasiones se ve alterado por eventos de calentamiento como El Niño.

La temperatura superficial del mar es una de las variables más importantes en el estudio del océano, por relacionarse directamente con el intercambio de energía (calor) y de humedad con la atmósfera baja. Los patrones de temperatura responden a los cambios atmosféricos (vientos y lluvias), oceánicos (corrientes y surgencias) y a la radiación solar. Por ello, en el contexto del clima, los estudios se centran en esta variable.

Algunas señales típicas de El Niño en la temperatura superficial del mar en el Pacífico Mexicano son:

1. Durante los años concurrentes o inmediatamente posteriores al Niño, la temperatura superficial del mar en el Pacífico Mexicano está por encima de lo normal.
2. Las tasas de pérdida de calor en el Golfo de California en otoño son menores en años Niño.
3. El Golfo de California es notoriamente más caliente que el Pacífico Mexicano Subtropical en inviernos posteriores a un Niño intenso.

Existe la tendencia a pensar en los mares tropicales como regiones de baja productividad y de poco interés económico. Este no es el caso del Pacífico Tropical Mexicano, pues de allí proviene, entre otras, la mayor parte de nuestra producción atunera. Al existir gran variabilidad interanual en los mares mexicanos, las zonas productivas también cambian.

Los cambios en la estructura del Pacífico Mexicano por causa de El Niño resultan en afectaciones en la productividad de la región, registrándose cambios en la abundancia y distribución de las poblaciones de peces, desde las lagunas costeras hasta las provincias oceánicas.

En resumen, aunque la mayor parte de la variabilidad interanual del agua caliente del Pacífico Mexicano está asociada con el fenómeno de El Niño, en ciertos años aparecen anomalías térmicas que pueden provocar cambios en el clima regional de México, principalmente a lo largo de la costa del Pacífico; Magaña (2004).

## 1.4 El Sector Pesquero en México

La pesca es una actividad importante para México, debido principalmente a que el país cuenta con 11,592.77 kilómetros de costas, de los cuales 8,475.06 corresponden al litoral del Pacífico y 3,117.71 al del golfo de México y mar Caribe, incluyendo islas; su plataforma continental es de aproximadamente 394,603 km<sup>2</sup>, siendo mayor en el golfo de México; además cuenta con 12,500 km<sup>2</sup> de lagunas costeras y esteros y dispone de 6,500 km<sup>2</sup> de aguas interiores, como lagos, lagunas, represas y ríos. Al establecerse en 1976 el régimen de 200 millas náuticas de “zona económica exclusiva”, quedan bajo jurisdicción nacional 2,946,885 km<sup>2</sup> de región marina nacional; (Figura 1.3), Cienfuentes, Torres y Frías (2003). Esta gran dimensión del litoral favorece una actividad de captura que en condiciones normales, satisface el mercado interno y permite tener excedentes para la exportación, principalmente para los mercados de Estados Unidos y Canadá.

Los ecosistemas de las zonas tropicales se caracterizan porque en ellos vive una gran diversidad de especies y no se encuentra alguna que domine por su abundancia; esto sucede en las aguas que bañan las costas mexicanas, lo que ofrece al país ventajas que han permitido establecer grandes



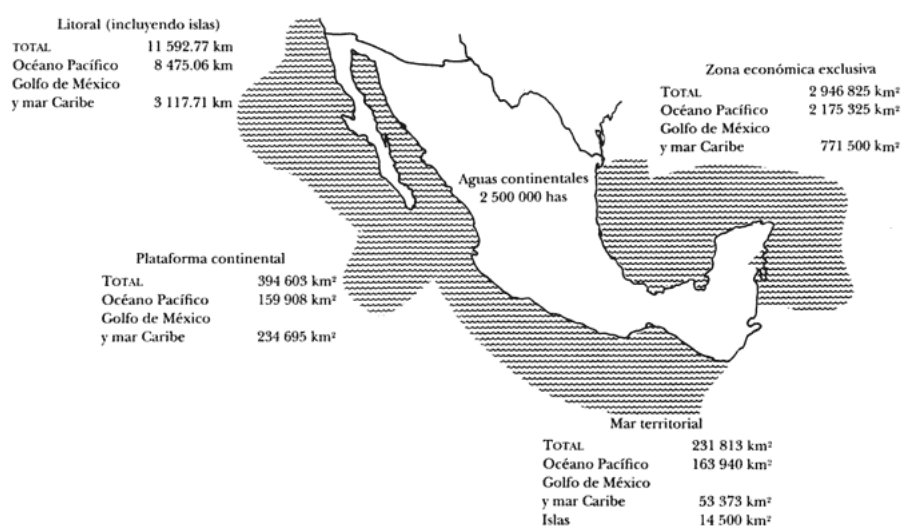


Figura 1.3: Características geográficas de las aguas continentales de México. Tomado de Cienfuentes, Torres y Frías (2003).

pesquerías comerciales, principalmente en el golfo de California, en la costa occidental de la península de Baja California, así como pesquerías tropicales a lo largo de todos sus litorales.

Los reportes más recientes publicados por CONAPESCA (Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca), SAGARPA (2008), indican que el volumen total de la producción pesquera nacional en peso vivo es de 1,745,424 toneladas, las cuales representan un valor total de 16,884 millones de pesos, registrando una población de 273,784 empleos directos en la captura y en pesquerías acuaculturales. Los principales estados con mayor participación en el volumen de producción son los estados de Sonora, Sinaloa, Baja California y Baja California Sur con el 77% del volumen total de la producción pesquera y acuícola nacional y con una participación del 62% en el valor total y registrando un población de 87,658 empleos directos, ver Tabla 1.1 y 1.2.

Por otro lado, la participación de las especies como la sardina, el camarón y los túnidos que se capturan en altamar y acuacultura representan el 63.2% del volumen de la producción pesquera nacional en peso vivo. Cabe mencionar que en seis especies se concentraron tres cuartas partes del volumen de la producción total, destacando por su participación las especies como el calamar, la mojarra y el ostión. Además, estas especies representan el 65.8% del valor total de la producción pesquera nacional, ver Tabla 1.1 y 1.2.

Es importante señalar que los estados con mayor participación en el volumen de producción total (mencionados anteriormente), son los estados que también tienen una participación importante en la captura de especies como la sardina, el camarón, los túnidos, el calamar, la mojarra y el ostión, ya que representan el 82% de la suma total de la producción de estas especies, equivalentes a un 76% del valor total de la producción nacional, ver Tabla 1.1 y 1.2.

El consumo nacional aparente se ha venido incrementando durante los últimos diez años, siendo el consumo per capita de 9.10 kg para los productos de consumo humano directo, y de 4.49 kg

## 1 El Fenómeno de El Niño y la Pesca en México

Especie	B. Calif. (Miles Ton)	B. Calif. Sur (Miles Ton)	Sinaloa (Miles Ton)	Sonora (Miles Ton)	Total (Miles Ton)	Total Nacional (Miles Ton)
Producción Total	117,768	185,903	296,750	743,680	1,344,101	1,745,424
Atún	7,198	1,514	60,193	–	68,905	91,075
Calamar	6,266	50,090	1,865	26,216	84,437	84,480
Camarón	1,014	4,264	60,441	96,557	162,277	196,289
Mojarra	75	343	7,500	782	8,701	74,874
Ostión	1,077	612	341	80	2,111	44,452
Sardina	77,565	68,846	96,706	572,351	815,468	815,520
Total de Especies	93,195	125,669	227,047	695,986	1,141,899	1,306,691

Tabla 1.1: Volúmenes de producción pesquera total y por especie en el 2008 en miles de toneladas (Ton) de los estados con mayor participación en la producción nacional; SAGARPA (2008).

Especie	B. Calif. (Miles MX\$)	B. Calif. Sur (Miles MX\$)	Sinaloa (Miles MX\$)	Sonora (Miles MX\$)	Total (Miles MX\$)	Total Nacional (Miles MX\$)
Valor Total	798,901	994,121	3,828,799	4,847,817	10,469,639	16,884,106
Atún	262,667	18,984	572,366	–	854,017	1,105,386
Calamar	12,283	65,020	4,835	45,297	127,435	127,669
Camarón	66,490	163,172	2,455,503	4,162,478	6,847,644	8,256,617
Mojarra	1,462	1,753	79,862	9,865	92,942	977,217
Ostión	17,530	6,025	3,291	1,579	28,426	161,976
Sardina	55,301	51,799	51,404	317,910	476,414	476,599
Total de Especies	415,734	306,753	3,167,261	4,537,129	8,426,877	11,105,464

Tabla 1.2: Valor de la producción pesquera total y por especie en el 2008 en miles de pesos (MX\$) de los estados con mayor participación en la producción nacional; SAGARPA (2008).

en el consumo humano indirecto, con un total de 13.60 kg; SAGARPA (2008).

En cuanto al mercado exterior, las exportaciones de los productos de alto valor comercial han venido incrementándose paulatinamente. Actualmente el volumen exportado es de 253,785 toneladas, con un valor de 799.323 millones de dólares. Mientras que 128,372 toneladas corresponden a las importaciones, con valor de 397.766 millones de dólares. Por lo tanto, se puede observar que la balanza comercial es positiva, debido a que se cuenta con un saldo de 401.557 millones de dólares; SAGARPA (2008).

Las especies como la sardina, el camarón, los túnidos y el calamar, no son solamente importantes por los volúmenes de captura, sino también por los volúmenes que ocupan en las exportaciones, ya que del volumen total exportado, estas especies representan el 43.7%, con un 59.2% del valor total; SAGARPA (2008).

### 1.4.1 El Niño y las pesquerías en México

Entre las actividades económicas que resienten el impacto de El Niño, una de las más afectadas es sin duda la pesca. Aunque en cifras globales las pérdidas parecen grandes, para cada sector pesquero del mundo existe una gran cantidad de variables que influyen en los volúmenes totales

de capturas. Además, debe reconocerse que los impactos de estos eventos son diferentes para cada rubro de la actividad. En el caso del fenómeno del Niño, las pesquerías del Pacífico Este son impactadas significativamente por encontrarse en la zona de influencia directa. Para el caso de México, no existen cifras oficiales, aunque se sabe que los impactos han sido severos, principalmente en el Pacífico, pues poco se sabe de cómo El Niño afecta al Golfo de México o al mar Caribe. Los cambios en el Pacífico significan graves pérdidas para nuestro país, por ser estos litorales los que aportan la mayor parte de la producción nacional en términos de volumen y de valor de producción.

La presencia de corrientes de agua más caliente de lo normal durante El Niño provocan la migración de especies regionales, como las de origen tropical que pueden encontrarse en mares de América del Norte. En el Golfo de California, El Niño provoca el rompimiento de la cadena alimentaria y una drástica disminución de la población de especies de alto valor comercial. Como por ejemplo, se puede producir una baja en la captura de sardina y calamar gigante.

Históricamente, El Niño 1997-98 ha sido el evento que más interés ha recibido en diversos sectores de la sociedad mexicana. Dentro de la actividad pesquera, dos de las pesquerías más grandes del Pacífico mexicano, sardina y calamar, experimentaron decrementos muy significativos en sus niveles de producción. El total del volumen de captura para ambas pesquerías en los años 97 y 98 tuvo una reducción de 212 mil toneladas, equivalentes a unos 16 millones de dólares, considerando únicamente el valor de la captura como materia prima, ver Tabla 1.3. Más significativo aún, entre ambos años se dejaron de exportar alrededor de 74 millones de dólares por disminuciones en la producción de organismos como calamar, algas marinas, atún, langosta y mariscos enlatados, principalmente abulón, ver Tabla 1.4; Magaña (2004).

Para el caso del calamar por ejemplo, se registró la pérdida de unos 3,200 empleos directos, correspondiendo algunos de estos, a personas que vendieron su patrimonio para hacerse de una embarcación ante la expectativa de lograr ganancias atractivas en poco tiempo. Otra de las pesquerías que registró importantes pérdidas socio-económicas derivadas de El Niño 97-98 fue la de captura y procesado de sardina en la región del Golfo de California. En esta actividad el potencial de empleos directos es de unos 3 mil, pero las malas temporadas pueden reducir esta cifra hasta en un 50%; Magaña (2004).

Afortunadamente no todo fueron pérdidas. El incremento en los precios del camarón en el mercado, asociado a la captura de 18 mil toneladas en 1997 y 1998, permitió compensar sobradamente el valor de la producción regional en más de 89 millones de dólares. Con esta situación, el balance y el valor de la producción a nivel del Pacífico mexicano se incrementó en más de 78 millones de dólares durante 1997 y 1998, ver Tabla 1.3. El aumento de los costos del camarón propició un avance en las exportaciones pesqueras nacionales de este crustáceo, ver Tabla 1.4. Este margen de ganancias se mantuvo a pesar de tener una reducción en el volumen de pesca mayor al 50% del total de 1996, con sólo 95 mil toneladas. Los ingresos en el período 97 y 98 descendieron sólo 6 millones de dólares, representando el 1% de los ingresos por este mercado en 1996; Magaña (2004).

1 El Fenómeno de El Niño y la Pesca en México

Especie/Zona	1996 (Ton)	1997 (Ton)	1998 (Ton)	Variación de Captura 1996-1997 (%)	Variación monetaria 1996-1997 (US\$)	Variación de Captura 1996-1998 (%)	Variación monetaria 1996-1998 (US\$)
<b>Calamar</b>							
Pacífico	107,966	120,877	26,611	12	2,530,556	-75	-15,945,580
B. California	17	7	101	-59	-1,960	494	16,464
B. California Sur	69,314	82,031	19,781	18	2,492,532	-71	-9,708,468
Sonora	33,976	31,283	2,268	-8	536,648	-93	-6,214,768
Sinaloa	3,029	4,075	2,523	35	205,016	-17	-99,176
<b>Atún y Similares</b>							
Pacífico	145,728	165,233	134,787	13	12,912,310	-8	-7,242,942
B. California	47,099	44,462	31,805	-6	-1,745,694	-32	-10,124,628
B. California Sur	17,975	14,735	11,928	-18	-2,144,980	-34	-4,003,114
Sinaloa	67,427	79,217	62,138	17	7,804,980	-8	-3,501,318
<b>Sardina</b>							
Pacífico	429,123	459,273	341,717	7	1,386,900	-20	-4,020,676
B. California	50,668	86,214	96,046	70	1,635,116	90	2,087,388
B. California Sur	44,361	48,445	24,080	9	187,864	-46	-932,926
Sonora	297,844	256,688	174,129	-14	-1,893,176	-42	-5,690,890
Sinaloa	36,220	67,916	47,448	88	1,458,016	31	516,488
<b>Camarón</b>							
Pacífico	57,430	66,505	66,243	16	45,302,400	15	43,994,496
B. California	397	547	900	38	748,800	127	2,510,976
B. California Sur	697	1,904	677	173	6,025,344	-3	-99,840
Sonora	15,231	19,504	18,560	28	21,330,816	22	16,618,368
Sinaloa	25,520	30,821	31,924	21	26,462,592	25	31,968,768
Total del Pacífico	740,247	811,888	569,358	10	62,132,166	-23	16,785,298

Tabla 1.3: Variaciones de la producción de las principales pesquerías del Pacífico mexicano, 1996-98 (peso vivo). Precios tomados a precios en playa de 1997 y dólares (US\$); SAGARPA (1996, 1997, 1998).

Especie	1996		1997		1998		Variación 1996-1997		Variación 1996-1998	
	Volumen (Ton)	Valor (US\$)	Volumen (Ton)	Valor (US\$)	Volumen (Ton)	Valor (US\$)	Volumen (Ton)	Valor (US\$)	Volumen (Ton)	Valor (US\$)
Algas y sargazos	24,386	10,490	32,665	12,140	5,673	3,140	8,279	1,650	-18,713	-7,350
Atunes y similares <sup>1</sup>	65,770	660,960	45,905	605,680	33,550	567,330	-19,865	-55,280	-32,220	-93,630
Calamar	19,957	184,210	24,957	254,190	7,780	105,600	5,000	69,980	-12,177	-78,610
Camarón	38,251	4,071,770	36,898	4,456,820	38,221	4,368,110	-1,353	385,050	-30	296,340
Langosta	2,037	335,070	1,697	257,060	1,184	172,590	-340	-78,010	-853	-162,480
Crustáceos y moluscos en conserva <sup>2</sup>	22,646	737,620	18,617	714,320	3,774	421,680	-4,029	-23,300	-18,872	-315,940
Total	173,047	,6000,120	160,739	630,0210	90,182	5,638,450	-12,308	300,090	-82,865	-361,670

Tabla 1.4: Variaciones en la exportación de productos pesqueros en México, 1996-98. Valores en toneladas y miles de dólares; SAGARPA (1996, 1997, 1998).  
<sup>1</sup>Incluye descargas en puertos extranjeros. <sup>2</sup>Incluye volumen y valor de abulón enlatado.

## **Conclusión capitular**

En el presente capítulo se ha mostrado como el fenómeno de El Niño afecta al Pacífico Mexicano provocando enormes pérdidas económicas dentro del sector pesquero en México. Se ha señalado que el aumento en la temperatura del mar del Pacífico mexicano provocado por este fenómeno produce bajas en los volúmenes de producción pesquera ocasionando también pérdidas de empleos.

También se ha mostrado la importancia que tiene el Sector pesquero dentro del Pacífico mexicano, puntualizando los estados de México con mayor afectación por dicho fenómeno, los cuales poseen los volúmenes más altos en cuanto a la producción y valor comercial en México. Se espera que esta información sea de utilidad para plantear un sistema de cobertura contra la caída en los volúmenes de producción pesquera utilizando los instrumentos financieros llamados opciones climáticas.

## 2 Opciones

Aunque el concepto detrás de estos instrumentos no es nuevo, las opciones han florecido desde principios de la década de 1970s, debido a una incursión en la valuación de opciones, la fórmula de Black-Scholes, y a los avances en el poder del cálculo. Debido a esto, hoy en día las opciones conforman una gran parte dentro del mercado de derivados.

Las Opciones son contratos que otorgan derechos. La compra de una Opción es una operación bursátil que otorga al comprador el derecho, pero no la obligación de comprar o vender una cantidad determinada de un activo subyacente a un precio fijo, en o antes de una fecha preestablecida, pagando un precio llamado Prima (el precio de la opción). A cambio de este precio o Prima, el vendedor de la Opción se obliga a comprar o vender la cantidad de activos establecida en el contrato, es decir, vende dicho derecho.

### 2.1 Tipos de Opciones

Existen dos tipos de opciones básicas. Las opciones de compra u *opciones call* otorgan a su comprador el derecho a comprar y a su vendedor la obligación de vender el activo subyacente, al precio de ejercicio y en una fecha predeterminada a cambio del pago a cargo del comprador o el cobro por cuenta del vendedor de una Prima. Las opciones de venta u *opciones put* otorgan a su comprador el derecho a vender y a su vendedor la obligación de comprar el activo subyacente, al precio de ejercicio y en una fecha predeterminada a cambio del pago a cargo del comprador o el cobro por cuenta del vendedor de una Prima.

Las opciones pueden ser clasificadas como opciones Americanas u opciones Europeas. Las *opciones Americanas* pueden ser ejercidas en cualquier momento antes o hasta la fecha predeterminada o de expiración. Las *opciones Europeas* solo pueden ser ejercidas en la fecha predeterminada o de expiración. Una opción Europea es generalmente más fácil de analizar que una opción Americana, y algunas de las propiedades de una opción Americana son frecuentemente deducidas de su contraparte Europea. Los términos Americana y Europea no se refieren a la localización de la opción o al mercado donde se comercian, algunas de las opciones que se comercian en los Estados Unidos son de tipo Europea.

Se debe enfatizar que una opción da al poseedor o comprador el derecho a hacer algo, y el comprador no tiene la obligación de ejercer este derecho. Esto es lo que distingue a las opciones de los forwards y los futuros, en los cuales el comprador está obligado a comprar o vender el activo subyacente.

### 2.1.1 Opciones Call

Consideremos la situación de un inversionista que compra una opción call Europea con un precio de ejercicio de \$100 pesos para adquirir 100 acciones. Supongamos que el precio de la acción en el mercado se encuentra en \$98 pesos, la fecha de expiración de la opción es de 4 meses, y el precio de la opción para adquirir la acción es de \$5 pesos. Entonces, la inversión inicial es de \$500 pesos. Debido a que la opción es Europea, el inversionista solo puede ejercerla hasta la fecha de expiración. Si el precio de la acción en el mercado para dicha fecha es menor de \$100 pesos, el inversionista elegirá no ejercerla, ya que no tiene sentido comprar en \$100 pesos una acción que en el mercado se encuentra por debajo de los \$100 pesos. En estas circunstancias el inversionista pierde toda su inversión inicial de \$500 pesos.

Ahora, si el precio de la acción en el mercado se encuentra por encima de los \$100 pesos en la fecha de expiración, la opción será ejercida. Supongamos, por ejemplo, que el precio de la acción en el mercado es de \$115 pesos. Al ejercer la opción, el inversionista está disponible a comprar 100 acciones a \$100 pesos por cada acción. Si las acciones son vendidas inmediatamente, el inversionista tendrá una ganancia de \$15 pesos por acción, o \$1,500 pesos, ignorando costos de transacción. Cuando se toma en cuenta el costo de la opción, la utilidad neta para el inversionista es de \$1,000 pesos.

La Figura 2.1 muestra cómo es la utilidad neta y la pérdida del inversionista sobre una opción al adquirir una acción que varía con el precio final del mercado del ejemplo anterior. Es importante tomar en cuenta que el inversionista algunas veces ejerce una opción y tiene pérdi-

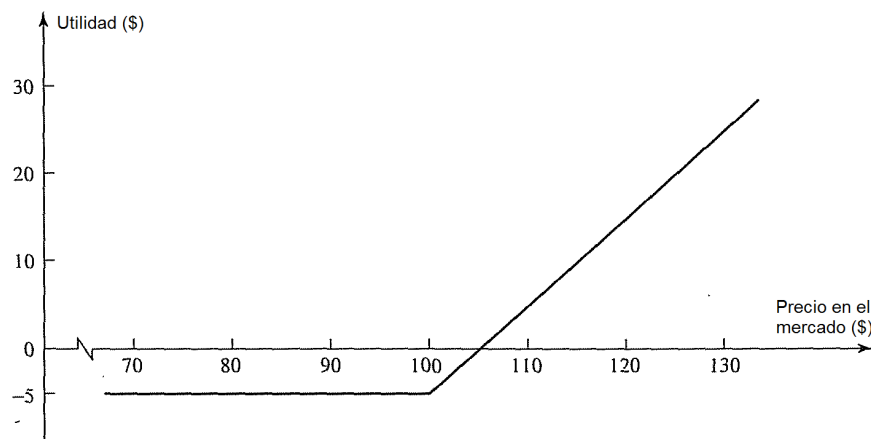


Figura 2.1: Utilidad de la compra de una opción call Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$5 pesos y precio de ejercicio = \$100 pesos. Tomado de Hull (2006)

das. Supongamos que en el ejemplo anterior, el precio en el mercado de la acciones es de \$102 pesos en la fecha de expiración de la opción. El inversionista ejercerá la opción para obtener  $100 \times (\$102 - \$100) = \$200$  pesos y tener una pérdida de \$300 cuando el costo de la opción es tomado en cuenta. Es tentador discutir que el inversionista no debería ejercer la opción en estas circunstancias. Sin embargo, el no ejercerla le dejaría una pérdida total de \$500 pesos, lo cual es peor que perder solo \$300 pesos cuando el inversionista ejerce la opción. En general, las opciones call siempre deben ser ejercidas en la fecha de expiración si el precio en el mercado está por encima del precio de ejercicio. La Figura 2.2 muestra la variación de la utilidad o de la pérdida en función del precio final de la acción en el mercado para el vendedor de la opción considerada en la Figura 2.1.

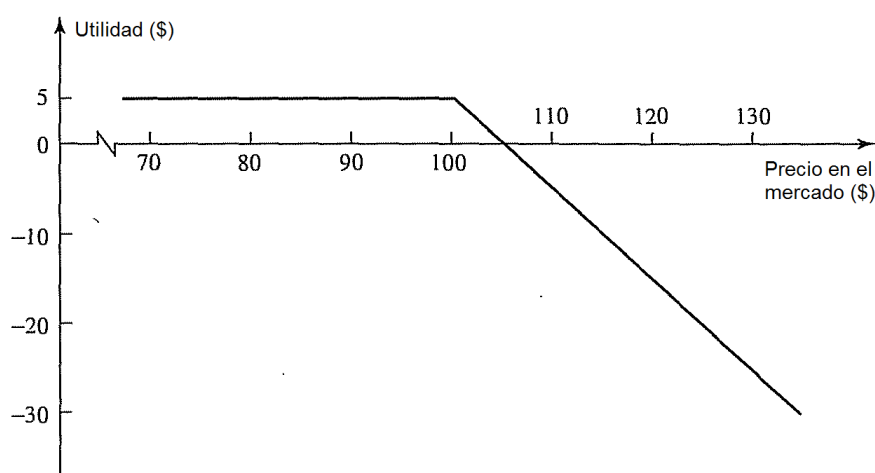


Figura 2.2: Utilidad de la venta de una opción call Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$5 pesos y precio de ejercicio = \$100 pesos. Tomado de Hull (2006).

### 2.1.2 Opciones Put

Mientras que al adquirir una opción call se espera que el precio de la acción en el mercado aumente, al adquirir una opción put se espera el precio de la acción en el mercado disminuya. Consideremos un inversionista que compra una opción put Europea para vender 100 acciones a un precio de ejercicio de \$70 pesos. Supongamos que el precio de la acción en el mercado se encuentra en \$65 pesos, la fecha de expiración de la opción es en 3 meses, y el precio de una opción para vender una acción es de \$7 pesos. Entonces la inversión inicial es de \$700 pesos. Debido a que la opción es Europea, ésta solo será ejercida si el precio de la acción en el mercado está por debajo de \$70 pesos hasta la fecha de expiración. Supongamos que el precio de la acción en el mercado está en \$55 pesos en la fecha de expiración. El inversionista puede comprar 100 acciones en \$55 pesos cada acción, y bajo los términos de la opción put, vender las mismas acciones en \$70 pesos, teniendo una ganancia de \$15 pesos por acción, o \$1,500 pesos. (De nueva cuenta los costos de transacción son ignorados). Cuando se toman en cuenta los \$700 pesos de costo de la opción, la utilidad neta del inversionista es de \$800 pesos. No hay



garantía de que el inversionista pueda obtener ganancias. Si el precio final de la acción en el mercado se encuentra por encima de \$70 pesos, la opción put expira sin tener ningún valor y el inversionista perderá los \$700 pesos. Para este ejemplo, la Figura 2.3 muestra la forma de la utilidad o la pérdida del inversionista sobre una opción para vender una acción que varía con el precio final de la acción en el mercado. La Figura 2.4 muestra la variación de la utilidad o de la pérdida en función del precio final de la acción en el mercado para el vendedor de la opción considerada en la Figura 2.3.

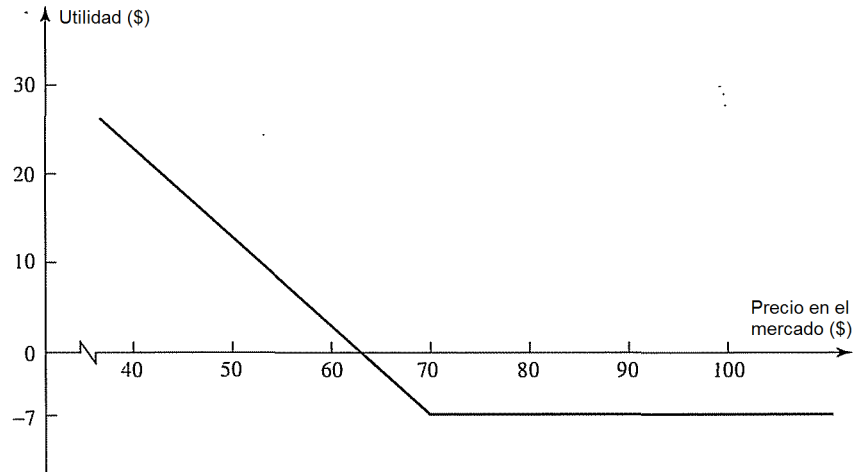


Figura 2.3: Utilidad de la compra de una opción put Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$7 pesos y precio de ejercicio = \$70 pesos. Tomado de Hull (2006)

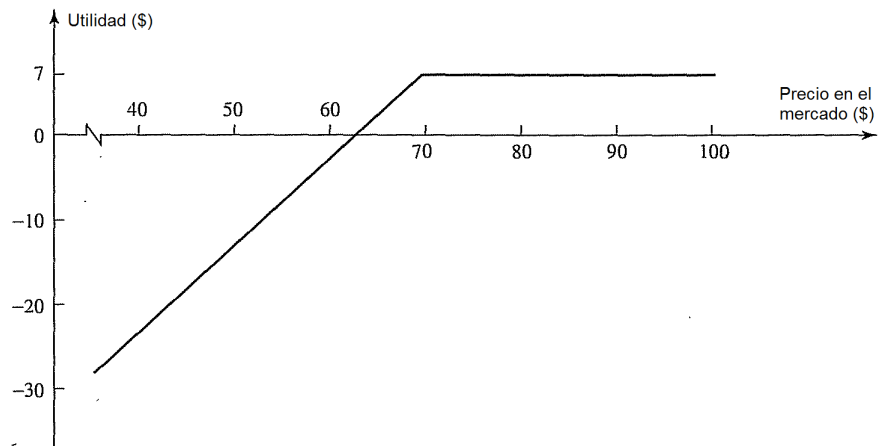


Figura 2.4: Utilidad de la venta de una opción put Europea sobre una acción. Precio de la opción = \$7 pesos y precio de ejercicio = \$70 pesos. Tomado de Hull (2006).

## 2.2 Posiciones en la Opción

Existen dos lados para cada contrato de opciones. Por un lado se tiene la posición larga, que es cuando el inversionista compra la opción. Y por el otro se tiene la posición corta, que es cuando el inversionista vende la opción.

Hay cuatro tipos de posiciones en la opción:

1. Una posición larga en una opción call
2. Una posición larga en una opción put
3. Una posición corta en una opción call
4. Una posición corta en una opción put

Esto es frecuentemente usado para caracterizar las posiciones en opciones Europeas en términos del valor terminal o pago para el inversionista en la madurez. Entonces el costo inicial de la opción no es incluido en el cálculo. Si  $K$  es el precio de ejercicio y  $S_T$  es el precio final del activo subyacente, el pago de una posición larga en una opción call Europea es:

$$C = \max(S_T - K, 0) \quad (2.1)$$

Esto refleja el hecho de que la opción será ejercida si  $S_T > K$  y no será ejercida si  $S_T \leq K$ . El pago para el poseedor o comprador de una posición corta en una opción call Europea es:

$$-\max(S_T - K, 0) = \min(K - S_T, 0)$$

El pago para el comprador de una posición larga en una opción put Europea es:

$$P = \max(K - S_T, 0) \quad (2.2)$$

y el pago desde una posición corta en una opción put Europea es:

$$-\max(K - S_T, 0) = \min(S_T - K, 0)$$

En la Figura 2.5 se ilustran estos pagos.

Entonces, si el precio de un activo  $S_T$  en el mercado se encuentra cerca o en el precio de ejercicio  $K$ , se dice que la opción se encuentra *en-el-dinero*. Si el precio de un activo  $S_T$  es tal que la opción puede ser ejercida con una utilidad, se dice que la opción está *dentro-del-dinero*. Si la situación es contraria, se dice que la opción está *fuera-del-dinero*.

Por lo tanto, un call estará dentro-del-dinero si  $S_T > K$ ; y un put estará dentro-del-dinero si  $S_T < K$ . Tanto un call como el put estarán en-el-dinero si el precio del subyacente coincide con el precio de ejercicio,  $S_T = K$ . Y un call estará fuera-del-dinero si  $S_T < K$ ; y un put

estará fuera-del-dinero si  $S_T > K$ ; dado que estas opciones no se ejercerán, el ejercicio se traduce en pérdidas, si asumimos que el comprador es racional, su valor intrínseco también es cero. Este razonamiento explica la definición de los valores intrínsecos de  $C$  y  $P$  de las ecuaciones (2.1) y (2.2) respectivamente.

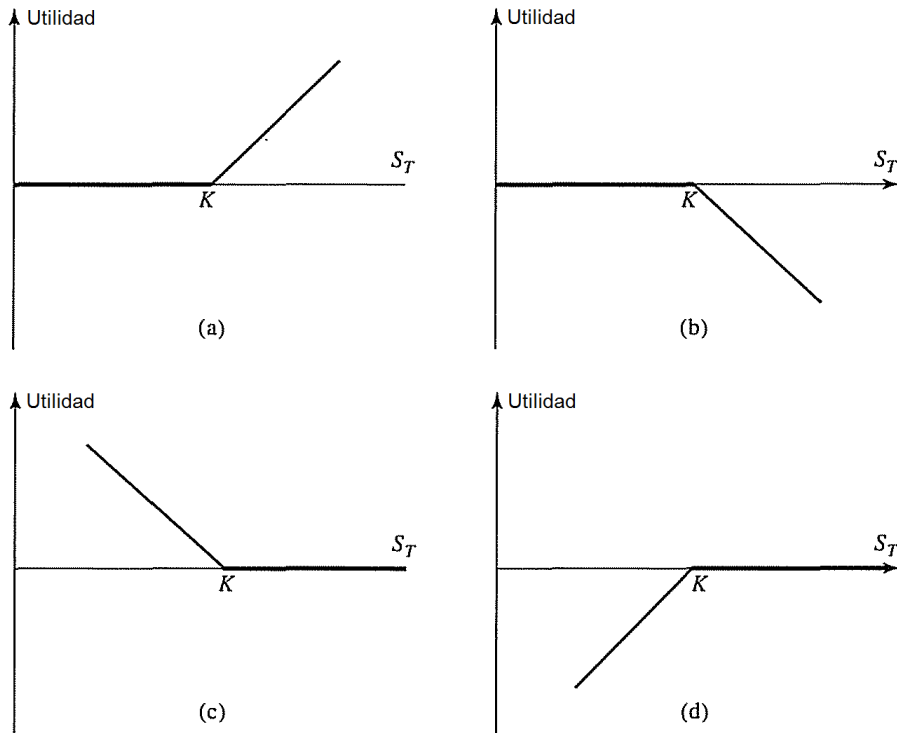


Figura 2.5: Pagos de la diferentes posiciones en las opciones Europeas: (a) call largo; (b) call corto; (c) put largo; (d) put corto. Precio de ejercicio =  $K$  y precio del activo en la madurez =  $S_T$ . Tomado de Hull (2006)

## 2.3 Valuación de Opciones

Aunque según algunos, el primer modelo de valuación de opciones fue propuesto por el premio nóbel de Economía, Paul Samuelson (1965), la historia de la valuación de opciones comienza con el trabajo de Fisher Black y el también premio nóbel Miron Scholes, publicado en 1973. A partir del trabajo de Black y Scholes (1973), se han investigado diferentes modelos de valuación los cuales se aplican a opciones sobre activos subyacentes específicos (acciones, divisas, futuros, materias primas, etc.).

Los modelos de evaluación se pueden dividir en dos enfoques:

1. Modelos analíticos, que en general se plantean en tiempo continuo, y suelen ser extensiones del modelo Black y Scholes (1973).

2. Modelos que exigen la utilización de algoritmos de cálculo numérico. El modelo más conocido dentro de este enfoque es el modelo de Cox, Ross y Rubinstein (1979), denominado generalmente modelo o método binomial. En los últimos años para múltiples modalidades de opciones se utiliza el denominado método de Monte Carlo propuesto por Boyle (1977).

### 2.3.1 Modelo de Black-Scholes

El modelo de Black-Scholes parte de algunos supuestos sobre la evolución del precio del subyacente. Fundamentalmente sus hipótesis de base son las siguientes:

- El mercado funciona sin fricciones: es decir, no existen costos de transacción, de información, ni impuestos y los activos son perfectamente divisibles.
- Las transacciones tienen lugar de forma continua y existe plena capacidad para realizar compras y ventas en descubierto (a crédito) sin restricciones ni costos especiales.
- La tasa libre de riesgo y la volatilidad deben ser conocidas y constantes en el horizonte de la valuación de las opciones.
- Las opciones son europeas y el subyacente no paga dividendos.
- El precio del subyacente sigue un movimiento geométrico browniano (un proceso de Wiener).
- No existen oportunidades de arbitraje.
- El activo subyacente tiene liquidez en un mercado eficiente.

A partir de los supuestos anteriores se tiene que el precio del subyacente  $S$  sigue un movimiento geométrico browniano, el cual ésta defino por:

$$\frac{dS_t}{S_t} = \mu dt + \sigma dW_t \quad (2.3)$$

donde  $dS_t$  la variación de  $S_t$  en el instante  $dt$ ,  $\mu$  la esperanza matemática del rendimiento instantáneo del subyacente,  $\sigma$  su desviación estándar y  $dW_t$  un proceso de Wiener<sup>1</sup>.

Entonces, suponiendo que  $C$  representa el precio de una opción call sobre  $S_t$  en un tiempo  $t$  y utilizando los supuestos anteriores, se deduce que la ecuación de Black-Scholes es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{2}\sigma^2 S_t^2 \frac{\partial^2 C}{\partial S_t^2} + rS_t \frac{\partial C}{\partial S_t} - rC = 0 \quad (2.4)$$

donde  $r$  es la tasa libre de riesgo.

<sup>1</sup>Recordemos que un proceso estocástico  $B = (B_t, t \in [0, \infty))$  se denomina “proceso de Wiener” si se cumplen las siguientes condiciones: a) Comienza en cero:  $B_0 = 0$ , b) Tiene incrementos estacionarios e independientes, c) Tiene trayectorias muestrales continuas: “ningún salto” y d) Para todo  $t > 0$ ,  $B_t$  tiene una distribución Normal  $N(0, t)$ .

La ecuación (2.4) tiene muchas soluciones correspondientes a los diferentes derivados que puedan ser definidos con  $S_t$  como variable fundamental. La solución de la ecuación depende de las condiciones de frontera que se usen. Para el caso de una opción call Europea las condiciones de frontera son:

$$C(S_T, T) = \text{máx}(S_T - K, 0), \quad \text{cuando } t = T$$

Para el caso de una opción put Europea son:

$$P(S_T, T) = \text{máx}(K - S_T, 0), \quad \text{cuando } t = T$$

O bien, en términos del valor esperado tenemos:

$$C(S_T, T) = e^{-rT} \text{E}[\text{máx}(S_T - K, 0)]$$

$$P(S_T, T) = e^{-rT} \text{E}[\text{máx}(K - S_T, 0)]$$

Por lo tanto, la solución de la ecuación (2.4) de Black-Scholes en el tiempo  $t = 0$  nos proporciona el precio de una opción call Europea sin pago de dividendos y el precio de una opción put sin pago de dividendos de la forma:

$$C(S_t, t) = S_t N(d_1) - K e^{-rt} N(d_2)$$

$$P(S_t, t) = K e^{-rt} N(-d_2) - S_t N(-d_1)$$

donde

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S_t}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right) T}{\sigma \sqrt{T}}$$

$$d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{T}$$

La función  $N(x)$  es la función de distribución de probabilidad acumulada para una distribución normal estandarizada. En otras palabras, es la probabilidad de que una variable con una distribución normal,  $N(0, 1)$  sea menor que  $x$ . Esto se ilustra en la Figura 2.6. Las variables  $C$  y  $P$  son el precio del call Europeo y del put Europeo respectivamente,  $S_t$  es el precio del activo subyacente,  $K$  es el precio de ejercicio,  $r$  es la tasa libre de riesgo continuamente capitalizable,  $\sigma$  es la volatilidad del precio del activo subyacente y  $T$  es el tiempo para madurez o el período de expiración de la opción.

### 2.3.2 Modelo de Simulación Monte Carlo

El método de simulación Monte Carlo es un método de simulación numérica que se suele utilizar para la valuación de opciones, para el cual no existen fórmulas cerradas como por ejemplo las fórmulas de Black-Scholes. Esta metodología se puede utilizar para la valuación de la gran mayoría de las opciones de tipo europeo y para múltiples modalidades de opciones exóticas, las cuales se comentarán más adelante. El método de Monte Carlo se utiliza para simular

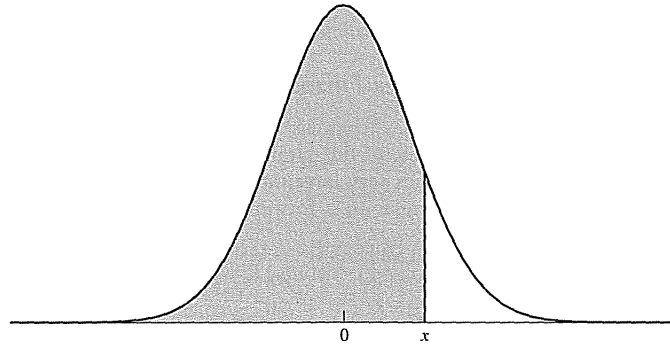


Figura 2.6: La parte sombreada representa a  $N(x)$ .

un rango muy grande de procesos estocásticos. La valuación de las opciones se realiza en un mundo de riesgo neutral, es decir, descontamos el valor de la opción a la tasa libre de riesgo. La hipótesis de partida del modelo es que el logaritmo natural del activo subyacente sigue un proceso geométrico browniano, de la forma de la ecuación (2.3), de manera que tendríamos:

$$S_t + dS_t = S_t \exp \left[ \left( \mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) dt + \sigma dW_t \right] \quad (2.5)$$

donde  $S_t$  es el nivel del activo subyacente,  $\mu$  es la tasa de retorno esperada del activo subyacente,  $\sigma$  es la volatilidad del activo subyacente y  $dW_t$  es un proceso de Wiener con desviación estándar 1 y media 0.

Para simular el proceso, debemos transformar la ecuación (2.5) en tiempo discreto, es decir, dividimos el tiempo en intervalos  $\Delta t$ , de forma que obtendríamos la siguiente ecuación:

$$S_t + \Delta S_t = S_t \exp \left[ \left( \mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) \Delta t + \sigma \epsilon_t \sqrt{\Delta t} \right] \quad (2.6)$$

donde  $\Delta S_t$  es la variación en tiempo discreto para  $S_t$  en el intervalo de tiempo elegido  $\Delta t$ ,  $\mu$  es la tasa de retorno esperada del activo en un mundo libre de riesgo,  $\sigma$  es la volatilidad del activo subyacente y  $\epsilon_t$  es un número aleatorio que se distribuye de forma normal estándar  $N(0, 1)$ .

La ecuación (2.6) para un salto temporal  $\Delta t$  y para un activo que no pague dividendos tiene la siguiente forma:

$$S_{t+1} = S_t \exp \left[ \left( \mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) \Delta t + \sigma \epsilon_t \sqrt{\Delta t} \right] \quad (2.7)$$

donde  $S_t$  es el precio del activo subyacente,  $r$  es el tipo de interés libre de riesgo,  $\sigma$  es la volatilidad del activo subyacente,  $\epsilon_t$  es un número procedente de una distribución  $N(0, 1)$  y  $\Delta t$  es el vencimiento de la opción en años.

A medida que el  $\Delta t$  es más pequeño (menor salto temporal entre un momento y otro), más precisa es la simulación. El número de simulaciones dependerá del nivel de exactitud que queramos

obtener con el modelo. Normalmente a partir de 10,000 simulaciones los resultados obtenidos son fiables; Lamothe (2003). El principal inconveniente de la simulación es el elevado costo computacional, es decir, el tiempo en el que el ordenador ejecuta la simulación.

Generalmente para realizar una simulación se utiliza el método de Box-Müller, sin embargo, en este trabajo se utiliza el método Ziggurat, el cual se trata de un algoritmo desarrollado por George Marsaglia para generar de forma más rápida números aleatorios distribuidos normalmente  $N(0, 1)$ ; Marsaglia y Tsang (2000).

El algoritmo Ziggurat es un método básico de muestras de rechazo, es decir, para un conjunto de puntos  $\mathcal{Z}$  que contiene al conjunto  $\mathcal{C}$  ( $\mathcal{Z} \supset \mathcal{C}$ ) de puntos  $(x, y)$  bajo la gráfica de una curva  $y = f(x)$  con área finita se escoge un punto aleatorio  $(x, y)$  de  $\mathcal{Z}$  tal que se consiga un punto que caiga dentro del conjunto  $\mathcal{C}$ .

Para generar números aleatorios distribuidos normalmente se escoge al conjunto  $\mathcal{C}$  como la región bajo la curva  $y = f(x) = c \exp(x^2/2)$ , la cual se trata de la función de densidad de probabilidad de distribución normal, donde  $c = 1/(2\pi)^{1/2}$  es la constante de normalización. Si generamos puntos aleatorios  $(x, y)$  uniformemente distribuidos en el plano, y rechazamos todos aquellos puntos que no caen dentro de la curva, las  $x$  restantes forman la distribución normal deseada.

Por otro lado se escoge al conjunto  $\mathcal{Z}$  como la unión de  $n$  conjuntos que deben tener la misma área,  $n - 1$  rectángulos y una franja inferior con cola infinita que cubre el área bajo la función de densidad de probabilidad. La Figura 2.7 muestra solamente 8 conjuntos para tener una mejor claridad, ya que en la práctica se escogen 64, 128 y 256 conjuntos cuya unión es  $\mathcal{Z}$  (Actualmente los códigos utilizan un conjunto de 128); Marsaglia y Tsang (2000).

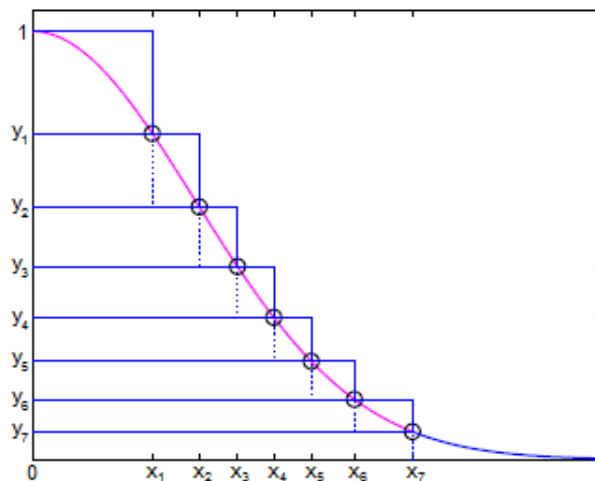


Figura 2.7: Método Ziggurat. Tomado de Moler (2004)

Dados los vectores de variables aleatorias uniformes  $U_1(0, 1)$  y  $U_2(0, 1)$ , puede describirse el procedimiento completo del algoritmo Ziggurat con los siguientes pasos:

1. Se escoge aleatoriamente una sección del conjunto  $\mathcal{Z}$ :  $0 < i < n$ ;  $i = 0, \dots, 127$
2. Sea  $x = U_1 x_i$
3. Si  $x < x_{i-1}$ , vuelve a  $x$
4. Si  $i = 0$ , devuelve  $x$  desde la cola de la función normal
5. Si  $[f(x_{i-1}) - f(x_i)]U_2 < f(x) - f(x_{i-1})$ , vuelve a  $x$
6. En cualquier otro caso regresa al paso 1

Cuando se escoge  $i = 0$ , para el caso de una distribución normal, Marsaglia (Marsaglia (1964)) sugiere un algoritmo compacto para poder devolver  $x$ , el cual puede describirse como sigue:

1. Sea  $x = \ln(U_1)/x_{127}$
2. Sea  $y = \ln(U_2)$
3. Si  $2y > x^2$ , entonces devuelve  $x + x_{127}$  (típicamente el valor de  $x_{127} = 3.4426$ )
4. En cualquier otro caso regresa al paso 1

Una vez que se generan las series de números aleatorios, se estima el valor intrínseco para determinar el precio de la opción. Para la opción call Europea se obtiene:

$$C(S_i) = e^{-rT} \max(S_i - K, 0)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C(S_i)$$

Para la opción put Europea obtenemos:

$$P(S_i) = e^{-rT} \max(K - S_i, 0)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(S_i)$$

### 2.3.3 Modelo Binomial

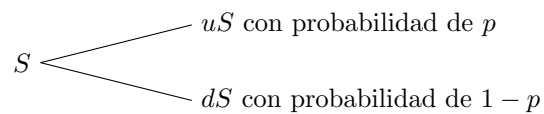
El modelo binomial, propuesto por Cox, Ross y Rubinstein (1979) básicamente asume lo siguiente:

- La eficiencia y profundidad de los mercados.
- La ausencia de costos de transacción.
- Es posible comprar y vender en descubierto, sin límite.



- Los activos son perfectamente divisibles.
- Se puede prestar y tomar prestado al mismo tipo de interés.
- Todas las transacciones se pueden realizar de forma simultánea.
- El precio del subyacente evoluciona según un proceso binominal multiplicativo.

La última hipótesis implica lo siguiente. Si  $S$  es el precio del subyacente en el momento presente, en un período de la evolución del mismo será:



donde  $u$  representa el movimiento multiplicativo al alza del precio del subyacente en un período, con una probabilidad asociada de  $p$ ; y  $d$  representa el movimiento multiplicativo a la baja del precio del subyacente en un período, con una probabilidad asociada de  $(1 - p)$ .

Si definimos  $\hat{r} = e^{r\Delta t}$ , siendo  $r$  la rentabilidad del activo libre de riesgo al principio del período, se deben verificar que:

$$d < \hat{r} < u$$

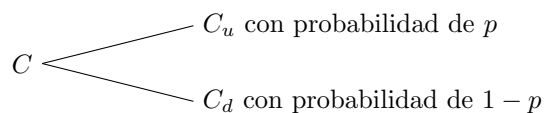
con  $d < 1$  y  $1 < u$  y  $r$ .

Supongamos que tenemos una opción call europea con vencimiento a un período y con un precio de ejercicio  $K$ . Los valores al vencimiento de la opción serán:

$$C_u = \text{máx}(uS - K, 0)$$

$$C_d = \text{máx}(dS - K, 0)$$

La expresión anterior nos proporciona un método para valorar una opción de compra europea en un período. Así, el valor de la opción evolucionaría del siguiente modo:



De acuerdo a Augros y Navatte (1987), la evolución de una opción de compra en el universo de un período por el método binomial arroja las siguientes conclusiones:

1. La probabilidad no interviene en la fórmula de valuación de la opción.
2. El valor de  $C$  no depende del riesgo del mercado, sino del carácter aleatorio de la evolución de los precios del subyacente.

- El valor de  $C$  no depende de la actitud de los inversionistas ante el riesgo ya que no incluye ningún parámetro que se asocie con este factor. Por lo tanto, se puede admitir la evaluación de una opción, asumiendo arbitrariamente la hipótesis de neutralidad del inversionista ante el riesgo.

Si el inversionista es neutral al riesgo, el rendimiento esperado de la acción debe ser igual a la tasa de rentabilidad del activo libre de riesgo. Es decir:

$$puS + (1 - p)dS = \hat{r} \cdot S$$

con

$$p = \frac{\hat{r} - d}{u - d}$$

donde

$$\hat{r} = e^{r\Delta t}, \quad u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad \text{y} \quad d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$$

Para  $n$  períodos, los precios del subyacente evolucionarán según el diagrama de la Figura 2.8 y el valor de la opción según el diagrama de la Figura 2.9.

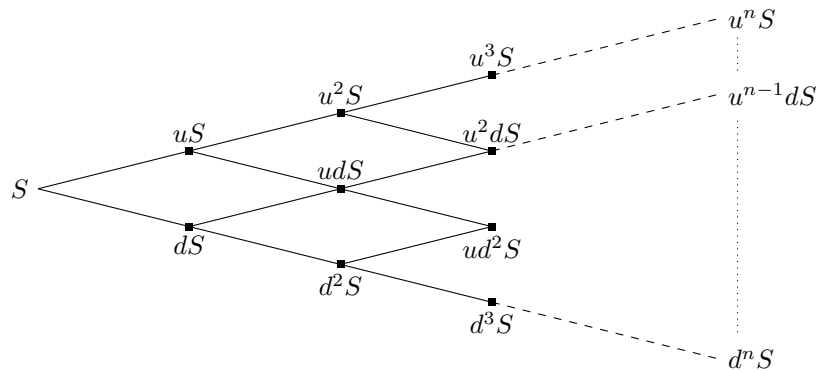


Figura 2.8: Evolución del activo subyacente según el proceso binomial multiplicativo en  $n$  períodos.

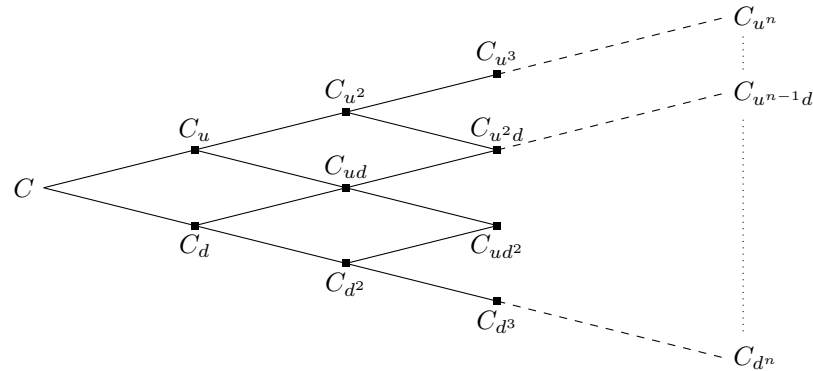


Figura 2.9: Evolución del valor de una opción de compra según el proceso binomial multiplicativo en  $n$  períodos del subyacente.

Así, la fórmula general de la valuación de una opción de compra europea para  $n$  períodos es:

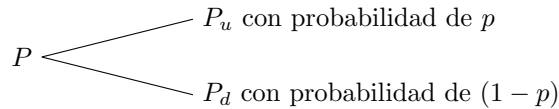
$$C = \frac{1}{\hat{r}^n} \left[ \sum_{j=0}^n \frac{n!}{j!(n-j)!} p^j (1-p)^{n-j} \max(u^j d^{n-j} S - K, 0) \right]$$

Donde  $p$  y  $\hat{r}$  se definieron anteriormente, y  $n$  es el número de períodos considerados para la valuación.

Para calcular los valores intrínsecos al final de los  $n$  períodos, y haciendo uso de un procedimiento recursivo para calcular el valor de la opción en cada nudo del diagrama o “árbol”, se utiliza la siguiente expresión:

$$C_{t-1} = \frac{1}{\hat{r}} [pC_{tu} + (1-p)C_{td}]$$

De forma análoga, se puede evaluar una opción de venta en función de la evolución del precio del activo subyacente, la evolución del valor del put será:



Y los valores al vencimiento de la opción serán:

$$P_u = \max(K - uS, 0)$$

$$P_d = \max(K - dS, 0)$$

Del mismo modo, el valor de una opción put europea para  $n$  períodos se puede expresar por:

$$P = \frac{1}{\hat{r}^n} \left[ \sum_{j=0}^n \frac{n!}{j!(n-j)!} p^j (1-p)^{n-j} \max(K - u^j d^{n-j} S, 0) \right]$$

Significando todos los términos, lo mismo que en expresiones anteriores.

También en el caso de las opciones put, es más recomendable valorar la opción calculando los valores intrínsecos en el último período y retrocediendo en el tiempo, calculando los diferentes  $P_i$  con la expresión:

$$P_{t-1} = \frac{1}{\hat{r}} [pP_{tu} + (1-p)P_{td}]$$

## 2.4 Opciones Exóticas

El fenómeno de las opciones exóticas tiene su origen en la década de los noventa, aunque se sabe que algunas de sus modalidades ya aparecían en mercados *Over The Counter* (OTC) a finales de la década de los sesenta. Sin embargo, no es sino hasta la década de los noventa cuando su

negociación comienza a ser relevante.

Las opciones exóticas son opciones cuya estructura de resultados es diferente a la de las opciones tradicionales, y que han surgido con la intención de abaratar el costo de las primas de las opciones tradicionales, o bien, para ajustarse más adecuadamente a determinadas situaciones. Es decir, se trata de opciones cuyas características, ya sea la determinación del precio de ejercicio, o del subyacente, o la prima, condiciones de pago, número de subyacentes, etc., difieren de las opciones clásicas.

A estas opciones exóticas también se les conoce con el nombre de opciones de segunda generación, ya que lo que tratan es de superar los límites de las operaciones estándar, las cuáles presentan en la mayoría de los casos tintes de rigidez. A partir de una *plain vanilla option*, o lo que es lo mismo, una opción sencilla, con ciertas modificaciones y en función de unas determinadas condiciones, se pueden diseñar distintos tipos de opciones exóticas. La Figura 2.10 recopila las opciones exóticas más comunes.

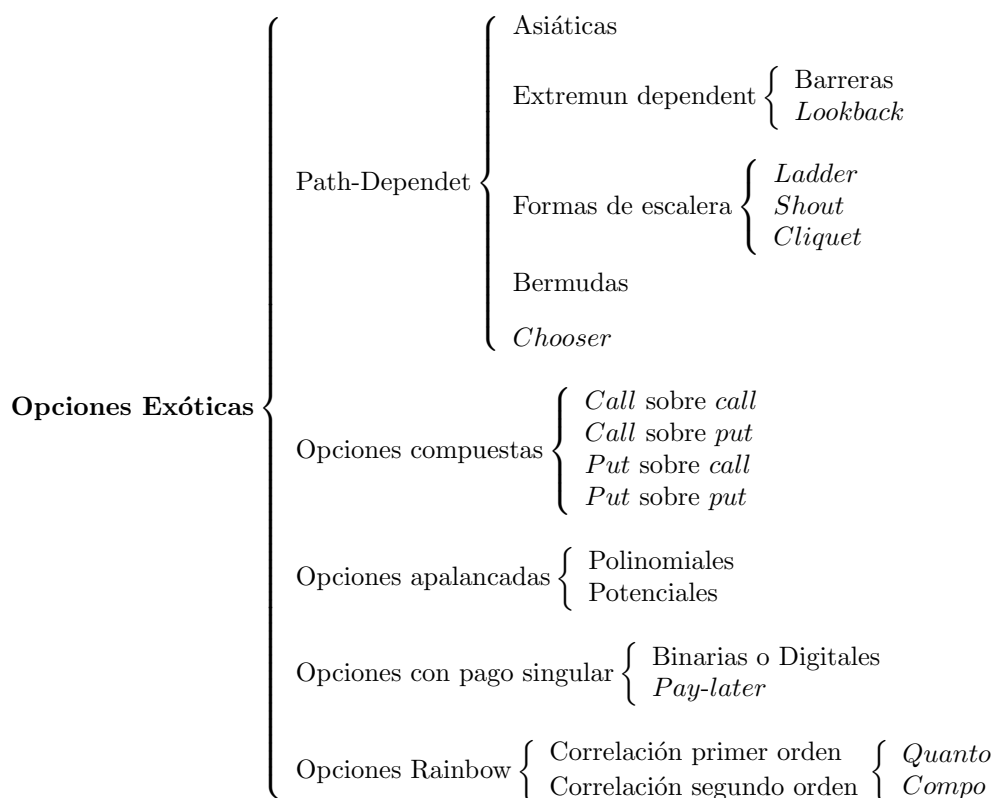


Figura 2.10: Recopilación de las opciones exóticas más comunes que se negocian tanto en el mercado OTC como también en los mercados organizados. Esquema tomado de García, Sancha, Tejero y Toscano (2000).

## **Conclusión capitular**

En este capítulo se han mostrado los tipos de opciones que se utilizan en los mercados de derivados actuales, debido a que las opciones que se espera utilizar dentro este trabajo deben poseer las mismas características de las opciones mostradas aquí.

También se han señalado las diferentes formas básicas de calcular el precio de las opciones, esto es de gran importancia ya que el precio de la opción climática que se plantea en este trabajo es calculado haciendo uso del método de simulación Monte Carlo, debido a que aún no se puede llevar a cabo la valuación de dichas opciones utilizando una fórmula cerrada de la forma de la ecuación de Black y Scholes.

## 3 Derivados Climáticos

El mercado de los derivados climáticos apareció primero en la industria energética de los Estados Unidos entre los años de 1996 y 1997. La propuesta de los derivados climáticos ha permitido desde entonces que los empresarios y otras organizaciones puedan asegurarse contra las fluctuaciones del clima, Jewson (2005).

### 3.1 Definición

Los derivados climáticos son contratos financieros con precios que dependen del clima de alguna forma. Las variables climáticas fundamentales pueden ser por ejemplo la temperatura, la humedad, la lluvia o la nieve.

Un contrato de un derivado climático común puede ser usado para cubrirse del riesgo debido al clima, dicho contrato está definido con las siguientes características:

- El período del contrato.
- Una estación de medición de la variable fundamental.
- Una variable climática, medida en la estación de medición durante el período del contrato.
- Un índice, el cual agregará a la variable climática durante el período del contrato de alguna forma.
- Una función del precio, la cual convierte al índice en un flujo de efectivo que liquidará el derivado al final del período del contrato.
- Y para algunos tipos de contratos, una prima pagada del comprador al vendedor al inicio del contrato.

Los derivados climáticos son designados a ayudar a las compañías a asegurarse contra eventos climáticos *no-catastróficos*. En las fluctuaciones climáticas no-catastróficas se incluyen los períodos de calor y de frío, los períodos de lluvia y de sequías, los períodos de viento, etc.

El cubrirse usando derivados climáticos puede resultar atractivo para diferentes empresarios, debido a que estos contratos reducen significativamente año con año la volatilidad de sus utilidades.

## 3.2 El Mercado de Derivados Climáticos

La primera negociación realizada en el mercado de derivados climáticos tomó lugar en los Estados Unidos entre los años de 1996 y 1997, Jewson (2005). El mercado dio un salto durante el fenómeno de El Niño del invierno de 1997-1998, el cual fue uno de los eventos más fuertes que se han registrado. Este fenómeno tuvo mucha publicidad en la prensa de los Estados Unidos. Muchas de las compañías decidieron entonces cubrirse contra el riesgo climático.

Después de que el mercado de los derivados climáticos se expandió rápidamente, los contratos empezaron a ser negociados en el mercado *over-the-counter* (OTC) como contratos negociados individualmente. En el mercado OTC estos contratos fueron manejados primero por las compañías del sector energético. Para incrementar el tamaño del mercado y así remover el riesgo de crédito de los contratos que se comercian, el *Chicago Mercantile Exchange* (CME) inició un mercado electrónico para los derivados climáticos en septiembre de 1999. Este fue el primer mercado organizado donde los derivados climáticos pudieron ser negociados.

El CME ofrece contratos de futuros y de opciones con períodos mensuales y de temporada basados en índices de temperatura, lloviznas, nevadas o huracanes en 24 ciudades de los Estados Unidos, seis en Canadá, 10 en Europa, dos en Asia del Pacífico y tres ciudades en Australia. El valor notional de los productos climáticos del CME aumentó de USD\$2.2 billones de dólares en el 2004 a USD\$18 billones de dólares en el 2007, con un volumen cercano a un millón de contratos negociados, CME (2005) y Myers (2007).

El mercado Europeo no se ha desarrollado tan rápido como el mercado de los Estados Unidos, pero hay un número de factores que indican su crecimiento potencial. Uno de estos es el hecho de que la industria energética de Europa no está aún completamente liberada, sin embargo, en cuanto se libere y se expanda por toda la industria, el volumen de los tratos climáticos negociados deberá de incrementarse en Europa. Esto mejorará la liquidez del mercado y alentará a nuevos actores a ingresar en el mercado.

## 3.3 Índices Degree-Days

Los índices *Degree-Days* (DD) fueron creados por la industria energética, y están designados a correlacionar la demanda doméstica del calor y del frío.

Los derivados climáticos son usualmente estructurados como swaps, futuros, opciones call/put

que están basados en diferentes índices climáticos. Algunos índices usados comúnmente son los heating degree-days y los cooling degree-days, los cuales fueron originados del sector energético de los Estados Unidos.

En invierno, los *heating degree-days* (HDDs) son usados para medir la demanda de calor, y así poder medir como es el frío en esa temporada (cuanto más frío haya, mayor es el número de HDDs). La definición usada dentro del mercado climático es que el número de HDDs sobre un día en particular está definido como:

$$HDD_i = \text{máx}(T_0 - T_i, 0) \quad (3.1)$$

donde  $HDD_i$  es el número de HDDs para el día  $i$ ,  $T_i$  es el promedio de la temperatura para el día  $i$ , y  $T_0$  es una temperatura de referencia.

Un índice  $H_n$  de HDDs en período de  $n$  días esta usualmente definido como la suma los  $HDD_i$  de todos los días del período, es decir:

$$H_n = \sum_{i=1}^n HDD_i \quad (3.2)$$

Los *cooling degree-days* (CDDs) son usados en verano para medir la demanda de energía usada para enfriar, y así poder medir como es el calor en esa temporada (cuanto más calor haya, mayor es el número de CDDs). La definición usada dentro del mercado climático es que el número de CDDs sobre un día en particular está definido como:

$$CDD_i = \text{máx}(T_i - T_0, 0) \quad (3.3)$$

donde  $CDD_i$  es el número de CDDs para el día  $i$ ,  $T_i$  es el promedio de la temperatura para el día  $i$ , y  $T_0$  es una temperatura de referencia.

Similar a los HDDs, el índice  $C_n$  de CDDs en período de  $n$  días está definido como la suma de los  $CDD_i$  de todos los días del período, es decir:

$$C_n = \sum_{i=1}^n CDD_i \quad (3.4)$$

Como se puede observar, el número de HDDs o de CDDs para un día específico es el número de grados que la temperatura se desvía a partir de un nivel de referencia. En los Estados Unidos, donde la temperatura es medida en Fahrenheit, la temperatura de referencia  $T_0$  usual es de 65 °F (18.33 °C), mientras que en otros países, donde la temperatura es medida en Celsius, la temperatura de referencia usual es de 18 °C (64.4 °F). La razón es que si la temperatura está por debajo de 18 °C las personas tenderán a usar más energía para calentar sus hogares, mientras que si la temperatura está por encima de los 18 °C las personas empezarán a encender su aire acondicionado para enfriarse.



La temperatura  $T_i$  para un día  $i$  dada una estación climática específica se define como:

$$T_i = \frac{T_i^{max} + T_i^{min}}{2} \quad (3.5)$$

donde  $T_i^{max}$  y  $T_i^{min}$  denotan la temperatura máxima y mínima medidas en el día  $i$ . Para este trabajo de Tesis la temperatura se tomará en grados Celsius.

### 3.4 Opciones Climáticas

Fuera del CME existe un número de diferentes contratos negociados en el mercado OTC. Un tipo común de estos contratos son las opciones. Como ya se revisó, existen dos tipos de opciones básicas, calls y puts. El comprador de un call HDD, por ejemplo, paga al vendedor una prima al inicio del contrato. Al retorno, si el número de HDDs para el periodo del contrato es superior al nivel de ejercicio predeterminado, el comprador recibirá un pago. El tamaño del pago es determinado por el nivel de ejercicio y el nominal o *tick size*. El nominal o *tick size* es la cantidad de dinero que el poseedor o comprador del call recibe por cada *degree-day* que se encuentre por encima del nivel de ejercicio durante el período del contrato. Frecuentemente la opción tiene un tope sobre el pago máximo distinto, por ejemplo, a las opciones tradicionales sobre acciones.

Una opción climática común puede ser formulada especificando los siguientes parámetros:

- El tipo de contrato (call o put).
- El período del contrato.
- El índice base (HDD o CDD).
- Una estación climática oficial de la cual se obtengan los datos de la temperatura.
- El nivel de ejercicio
- El nominal o *tick size*.
- El pago máximo (si existe alguno).

Para encontrar la fórmula del pago de una opción,  $K$  denotará el nivel de ejercicio y  $\alpha$  el nominal. Si el período del contrato consiste de  $n$  días y usando la definición de la ecuación (3.2), podemos escribir el pago de un call HDD sin tope como:

$$\chi = \alpha \text{máx}(H_n - K, 0) \quad (3.6)$$

Los pagos para contratos similares como los puts HDD y los calls/puts CDD son definidos de la misma forma.

### 3.4.1 El Pago Máximo

En la práctica, frecuentemente muchas opciones tienen un tope sobre el pago máximo. La razón de esto es para disminuir el riesgo que las condiciones climáticas extremas puedan causar. Una opción con un pago máximo podría ser construida de dos opciones sin pago máximo. Colocando una posición larga en una opción y una posición corta en la otra opción con un valor de ejercicio más alto, resulta en una función de pago como la que se observa en la Figura 3.1. Así, una opción con un pago máximo puede ser negociada como un portafolio de dos opciones comunes.

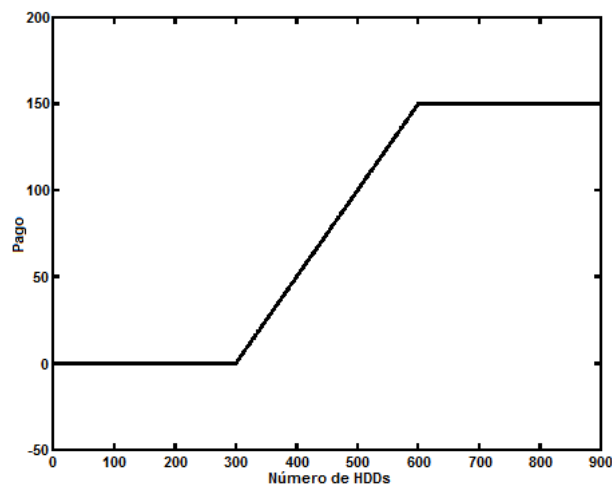


Figura 3.1: El pago de una opción call HDD con un pago máximo. Tomado de Alaton, Djehiche y Stillberger (2002).

## 3.5 Derivados Climáticos y Contratos de Seguros

Existen algunas diferencias entre los derivados climáticos y los contratos de seguros que pueden significar la preferencia de uno respecto al otro bajo ciertas circunstancias. Algunas compañías no están contentas con la idea de negociar con derivados, pero si se sienten cómodas adquiriendo un seguro, por ejemplo.

La principal diferencia entre los contratos de derivados y los de seguros es que el comprador de un contrato de un seguro tiene que demostrar que ha sufrido una pérdida financiera a causa del clima para que se le pueda compensar. Si el comprador no puede demostrarlo, la compañía de seguros no le pagará ningún dinero. El pago de un derivado climático está basado solamente en los resultados actuales del clima, sin importar como es que le afecta al comprador del derivado. Por ejemplo, uno no necesita tener alguna producción de algo que sea sensible al clima para poder beneficiarse de los derivados climáticos. Como cualquier derivado, estos contratos pueden ser comprados por mera especulación.

Los contratos de seguros son usualmente designados para proteger al comprador del contrato de eventos climáticos extremos, como para terremotos o huracanes. Los derivados climáticos, por otro lado, pueden ser estructurados para recibir pagos bajo cualquier condición climática.

Existe otra ventaja importante de los contratos de derivados comparados con los contratos de seguros. Supongamos que hay dos actores en el mercado, uno de los cuales tendrá ganancias si hay un invierno muy frío, mientras que el otro se beneficiará de un invierno caluroso. En un mercado de derivados estos dos actores pueden conocer y adquirir un contrato con el cual ellos puedan cubrirse cada uno del riesgo del otro. Esto no puede ser posible en el mercado asegurador.

## 3.6 Ejemplos de cobertura climática

La variabilidad climática afecta diferentes entidades en distintas formas. En muchas empresas, el clima está relacionado con el volumen de las ventas que se comercian. Ejemplos de esto podrían incluirse los siguientes:

- Una compañía abastecedora de gas natural podría vender una menor cantidad de gas durante un invierno caluroso.
- Un centro turístico para esquiar atraería solo algunos esquiadores cuando hay poca nieve.
- Una compañía de venta de ropa podría vender solo algunas prendas durante un verano frío.
- Un parque de diversiones atraería solo algunos visitantes durante temporadas de lluvia.

Pero el clima también puede afectar las ganancias de otra manera y no solo en el volumen de las ventas. Algunos ejemplos serían:

- En una compañía constructora tendría retrasos durante temporadas muy lluviosas, debido a que las labores no pueden llevarse a cabo.
- En una compañía hidroeléctrica se generaría menos electricidad cuando la lluvia es escasa.
- En un criadero de peces, estos crecerían lentamente debido a que la temperatura del mar desciende.

Todos estos riesgos pueden ser cubiertos usando derivados climáticos. Para entender cómo los derivados climáticos pueden ser usados, se dan dos ejemplos:

*Ejemplo 1.* Un vendedor de aceite para calefacción puede sentir que si el invierno es muy frío, éste puede tener altos ingresos, así que éste puede vender un call HDD. Si el invierno no es particularmente frío, el vendedor de aceite puede tomar la prima del call. Por otro lado, si el invierno es muy frío, al vendedor de aceite le “alcanza” para el pago de la opción debido a que

sus ingresos son altos. La compañía ha reducido de esta forma su exposición al riesgo climático. Alaton, Djehiche y Stillberger (2002).

*Ejemplo 2.* Este es un ejemplo tomado de la realidad. Una cadena de bares de vino llamada Corney & Barrow instalada en Londres, en un verano decidió adquirir cobertura para protegerse contra el mal clima, el cual podría reducir sus ventas. Los términos bajo los cuales se llevó a cabo el trato, fueron que si la temperatura caía por debajo de  $24^{\circ}\text{C}$  en jueves o viernes entre los meses de Junio y Septiembre la compañía recibiría un pago. Los pagos fueron acordados en £15,000 libras por día, hasta un máximo límite de £100,000 libras en total por todo el período completo. Alaton, Djehiche y Stillberger (2002).

## Conclusión capitular

Para la realización de este trabajo es importante conocer la definición y las características de los derivados climáticos, por esta razón dentro de este capítulo se marcan estos puntos, los cuales son de gran relevancia para conocer las especificaciones que deben poseer los contratos de las opciones para el sector pesquero, señalando también las ventajas que tienen estos contratos ante las aseguradoras.

Además se muestra la forma en que se debe calcular la demanda de calor y de frío haciendo uso de índices que dependen de la temperatura, para poder tomar a ésta como un subyacente y poder hacer el vínculo entre el mercado de derivados junto con una variable no negociable como la temperatura.

## 4 Modelación de la Temperatura del mar del Pacífico Mexicano

El propósito general de esta tesis es proponer un modelo de valuación de opciones para el Sector Pesquero del Pacífico Mexicano, enfocándose en tomar como variable fundamental la temperatura del mar. Por esta razón, se tratará de proponer un modelo que describa la temperatura, para así poder más adelante obtener el precio de los derivados climáticos, en particular el de las opciones climáticas basadas en la temperatura, lo que será de gran uso para tener una idea de cómo es el comportamiento del proceso de la temperatura.

Para encontrar el modelo de la temperatura del mar, se cuenta con una base de datos desde el 1 de noviembre de 1981 al 27 de junio de 2010 para diferentes regiones del Pacífico Mexicano (Figura 4.1). Los datos de la temperatura consisten de temperaturas promedio semanales, las cuales fueron medidas de acuerdo al análisis hecho por Reynolds, Rayner, Smith, Stokes y Wang (2002). La fuente de los datos fue obtenida de la Biblioteca de Datos Climáticos (Climate Data Library) de la Universidad de Columbia; IRI/LDEO (2010). La Figura 4.2 muestra la gráfica de la serie de temperaturas promedio semanales de la región del Golfo de California<sup>1</sup>.

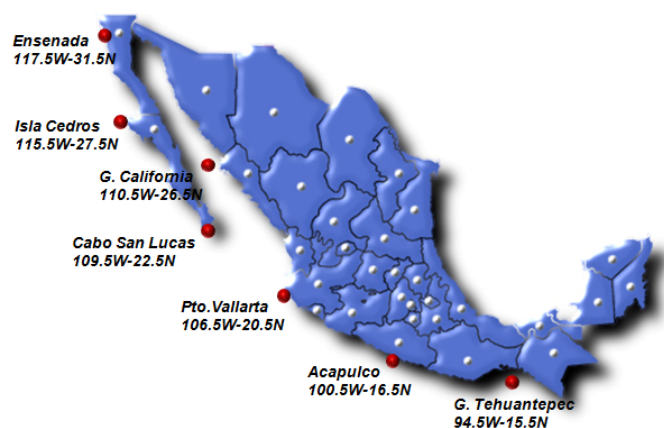


Figura 4.1: Localización de las regiones de las cuales se obtuvieron los datos.

<sup>1</sup>A partir de este capítulo se centrará en presentar principalmente el análisis y los resultados para la región del Golfo de California, ya que esta región aporta el mayor volumen de producción pesquera nacional, por supuesto sin dejar de mencionar y presentar los resultados más importantes de las demás regiones, sin embargo, los resultados obtenidos de menor relevancia para cada una de ellas se presenta en el Apéndice 1.

## 4.1 Modelo Determinista para la Temperatura del Mar

En la Figura 4.2 se puede observar claramente que hay una fuerte variación periódica en la temperatura. Se puede apreciar que debería ser posible modelar la dependencia periódica con, por ejemplo, una función seno de la forma  $\text{sen}(\omega t + \varphi)$ , donde  $t$  denota el tiempo medido en semanas. Así también, es conocido que el período de oscilación es de un año, por lo que tenemos que  $\omega = 2\pi/365$ . Debido a que las temperaturas promedio mínimas y máximas para las diferentes regiones no ocurren el 1 de Enero y el 1 de Julio respectivamente, por este motivo se debe introducir un ángulo de fase  $\varphi$ . Además, al observar las series de datos se puede apreciar una tendencia positiva en los datos. Este ligero aumento en la temperatura puede ser debido al calentamiento global que existe en el mundo, lo que provoca que la temperatura aumente cada año. Por esta razón, como primera aproximación, se asumirá una tendencia lineal debido al calentamiento global.

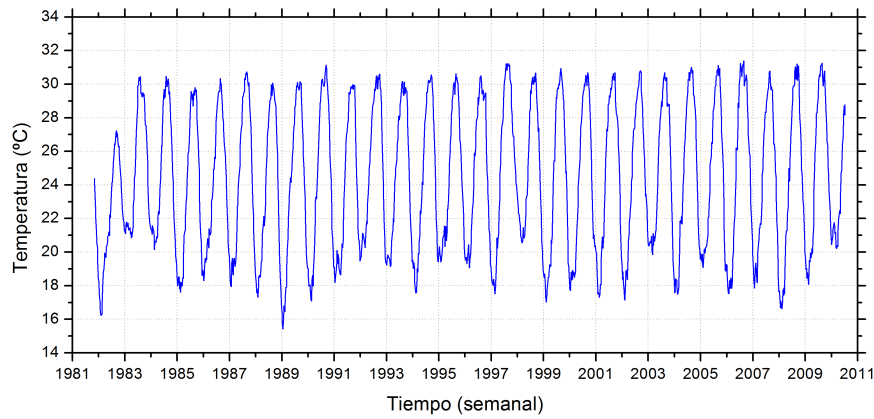


Figura 4.2: Temperaturas promedio semanal de la región del Golfo de California, 1981-2010. Las gráficas de las temperaturas para las regiones restantes se encuentran en el Apéndice 1.1. Datos obtenidos de IRI/LDEO (2010) y Reynolds, Rayner, Smith, Stokes y Wang (2002).

Asumiendo lo anterior, el modelo determinista para la temperatura promedio  $T_t^m$  en el tiempo  $t$ , deberá tener la forma

$$T_t^m = A + Bt + C \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (4.1)$$

donde los parámetros  $A, B, C$  y  $\varphi$  tendrán que ser escogidos de acuerdo a la curva que mejor se ajuste a los datos.

A partir del modelo de la ecuación (4.2) se estiman los valores numéricos de las constantes de la ecuación (4.1) para los datos de las temperaturas de las diferentes regiones, utilizando el método de mínimos cuadrados.

$$Y_t = a_1 + a_2 t + a_3 \text{sen}(\omega t) + a_4 \cos(\omega t) \quad (4.2)$$

Esto significa que se deben encontrar los parámetros del vector  $\xi = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ , cuya solución debe cumplir

$$\min_{\xi} \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\|^2 \quad (4.3)$$

donde  $\mathbf{Y}$  es el vector con los elementos de la ecuación (4.2) y  $\mathbf{X}$  es el vector de los datos. Las constantes del modelo (4.1) se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones

$$A = a_1 \quad (4.4)$$

$$B = a_2 \quad (4.5)$$

$$C = \sqrt{a_3^2 + a_4^2} \quad (4.6)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{a_4}{a_3}\right) - \pi \quad (4.7)$$

#### 4.1.1 Probando el Modelo a los Datos

Insertando los valores numéricos de las diferentes regiones de estudio dentro de la ecuación (4.2), se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 4.1.

Región	$A$	$B$ ( $\times 10^{-9}$ )	$C$	$\varphi$
Ensenada	17.63	8.77	2.65	-2.83
Isla Cedros	18.73	0.08	2.69	-0.07
G. California	24.39	18.98	5.97	-2.67
Cabo San Lucas	25.13	12.25	3.59	15.71
Pto. Vallarta	26.83	10.43	3.06	-2.95
Acapulco	28.95	3.51	1.04	-2.84
G. Tehuantepec	28.51	3.79	1.66	-2.20

Tabla 4.1: Valores numéricos estimados de los parámetros de la ecuación (4.1) para las diferentes regiones de estudio.

Como se muestra en la Tabla 4.1 la amplitud de la función seno varía de diferente forma para cada región, esto quizás sea debido a las anomalías de la temperatura ocasionadas por el fenómeno de El Niño. También se puede observar que la temperatura disminuye conforme se va más al norte, como era de esperarse. A partir de la Tabla 4.1 se obtiene que para la región del Golfo de California la función de la temperatura promedio  $T_t^m$  es:

$$T_t^m = 24.39 + 18.98 \times 10^{-9}t + 5.97 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}t - 2.67\right) \quad (4.8)$$

En esta región, como se puede observar en la Tabla 4.1, se presenta la amplitud más alta de la función seno, ya que es de alrededor de 6 °C, lo cual significa que la diferencia de temperatura entre un día frío y un día caliente es de alrededor de 12 °C. La gráfica de la función (4.8) junto con los datos de la temperatura se muestran en la Figura 4.3.

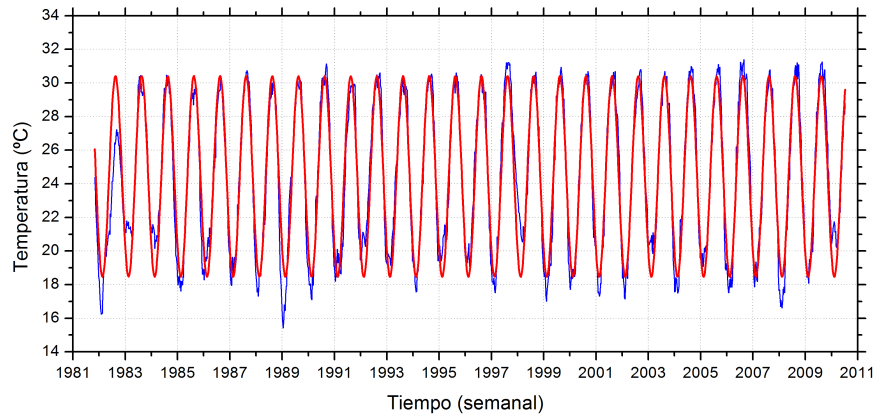


Figura 4.3: Temperatura promedio (4.8) y datos de las temperaturas de la región del Golfo de California, 1981-2010. Las gráficas de la temperatura promedio y datos de las temperaturas para las regiones restantes se encuentran en el Apéndice 1.2.

## 4.2 Dinámica estocástica de las Variaciones de la Temperatura

Desafortunadamente, las temperaturas no son deterministas. Por esta razón, para obtener un modelo más realista tenemos que agregar algún tipo de ruido al modelo determinista (4.1). Así, podemos escoger un proceso de Wiener estándar ( $W_t, t \geq 0$ ). Además, esto debe de ser razonable no solamente por considerar el trato matemático del modelo, sino también debido a que en la Figura 4.4 se puede observar una buena correlación de las diferencias de temperatura semanal junto con la distribución normal correspondiente, lo cual hace pensar que la probabilidad de conseguir pequeñas diferencias en la temperatura promedio semanal será ligeramente indeterminada de acuerdo a lo mencionado por Alaton, Djehiche y Stillberger (2002).

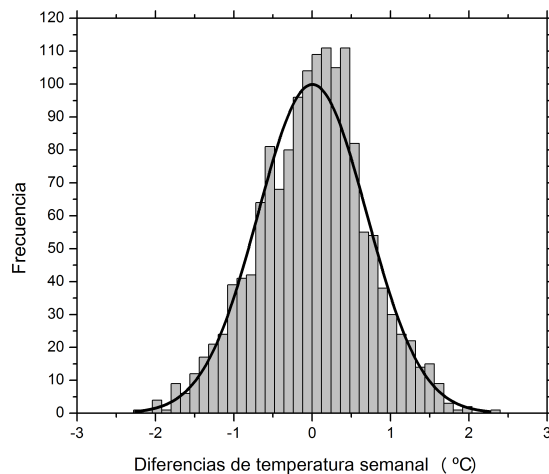


Figura 4.4: Histograma de las diferencias de temperaturas promedio semanal para la región del Golfo de California. El histograma de la diferencias de temperatura promedio semanal de las regiones restantes se pueden observar en el Apéndice 1.3.



Una observación en la serie de los datos revela que la variación cuadrática  $\sigma_t^2 \in \mathbb{R}_+$  de la temperatura varia a través de los diferentes meses del año, pero esta también se acerca a una constante dentro de cada mes. Por ejemplo, durante el verano y el invierno la variación cuadrática para las diferentes regiones se muestra más alta que durante el resto del año. Por lo tanto, se hace la suposición de que  $\sigma_t$  sea una función constante por segmentos, es decir que tendrá un valor constante para cada mes. Así  $\sigma_t$  que especificada como:

$$\sigma_t = \begin{cases} \sigma_1, \text{ durante Enero,} \\ \sigma_2, \text{ durante Febrero,} \\ \vdots \\ \sigma_{12}, \text{ durante Diciembre.} \end{cases}$$

Donde  $\{\sigma_i\}_{i=1}^{12}$  son constantes positivas. Por lo tanto, un proceso para el manejo del ruido de la temperatura estaría dado como  $(\sigma_t W_t, t \geq 0)$ ; Alaton, Djehiche y Stillberger (2002).

Por otro lado, es bien sabido que la temperatura no puede, por ejemplo, aumentar día a día por un largo tiempo. Esto significa que un modelo no debería permitir que la temperatura se desvíe de su media más que por periodos cortos de tiempo. En otras palabras, el proceso estocástico que describe a la temperatura debe tener la propiedad de *reversión a la media*.

Entonces, colocando todas las suposiciones juntas, la temperatura quedaría modelada por un proceso estocástico obtenido de la solución de la siguiente ecuación diferencial estocástica:

$$dT_t = a(T_t^m - T_t)dt + \sigma_t dW_t \quad (4.9)$$

donde  $a \in \mathbb{R}$  determina la rapidez de reversión a la media. A la solución de dicha ecuación usualmente se le conoce como Proceso de Ornstein-Uhlenbeck.

El problema con la ecuación (4.9) es que de hecho, a la larga no revierte a la media  $T_t^m$ . Por lo que para obtener un proceso que realmente revierta a la media (4.1) tenemos que agregar el término

$$\frac{dT_t^m}{dt} = B + \omega C \cos(\omega t + \varphi) \quad (4.10)$$

dentro del coeficiente del tiempo en (4.9). Como la temperatura media  $T_t^m$  no es constante, el término (4.10) ajustará el coeficiente del tiempo, tal que la solución de la ecuación diferencial estocástica (4.9) obtenga a la larga media  $T_t^m$ ; Alaton, Djehiche y Stillberger (2002).

Por lo tanto, iniciando en  $T_s = x$  se consigue el siguiente modelo para la temperatura:

$$dT_t = \left\{ \frac{dT_t^m}{dt} + a(T_t^m - T_t) \right\} dt + \sigma_t dW_t, \quad t > s \quad (4.11)$$

cuya solución es:

$$T_t = (x - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_t^m + \int_s^t e^{-a(t-\tau)} \sigma_\tau dW_\tau \quad (4.12)$$

donde

$$T_t^m = A + Bt + C \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

#### 4.2.1 Estimadores de $\sigma$

De acuerdo a lo presentado en Alaton, Djehiche y Stillberger (2002) se desarrollarán dos estimadores de  $\sigma$  a partir de la serie de datos. Dado un mes específico  $\mu$  de  $N_\mu$  semanas, se denota como  $T_j, j = 1, \dots, N_\mu$  a las temperaturas observadas durante el mes  $\mu$ . El primer estimador está basado en las variaciones cuadráticas de  $T_t$ ; Basawa y Prasaka Rao (1980) como:

$$\sigma_\mu^2 = \frac{1}{N_\mu} \sum_{j=0}^{N_\mu-1} (T_{j+1} - T_j)^2 \quad (4.13)$$

El segundo estimador es derivado de la discretización de la ecuación (4.11) y suponiendo que la ecuación discretizada se comporta como una ecuación de regresión, se tiene que el segundo estimador de  $\sigma_\mu$ ; Brockwell y Davis (1990), durante un mes dado  $\mu$  esta dado como:

$$\sigma_\mu^2 = \frac{1}{N_\mu - 2} \sum_{j=1}^{N_\mu} (\tilde{T}_j - \hat{a}T_{j-1}^m - (1 - \hat{a})T_{j-1})^2 \quad (4.14)$$

donde

$$\tilde{T}_j \equiv T_j - (T_j^m - T_{j-1}^m)$$

#### 4.2.2 Estimador del parámetro de reversión a la media

Para poder encontrar la estimación de  $\sigma_\mu$  en (4.14), se necesita encontrar un estimador de  $a$ . Para esto, es apropiado estimar el parámetro de reversión a la media  $a$  usando el método de funciones de estimación martingala sugerido por Bibby y Sørensen (1995). Basándose en las observaciones de la temperatura sobre  $n$  semanas, un estimador eficiente de  $\hat{a}_n$  de  $a$ , esta dado como; Alaton, Djehiche y Stillberger (2002):

$$\hat{a}_n = -\ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n Y_{i-1} \{T_i - T_i^m\}}{\sum_{i=1}^n Y_{i-1} \{T_{i-1} - T_{i-1}^m\}} \right) \quad (4.15)$$

donde

$$Y_{i-1} \equiv \frac{T_{i-1}^m - T_{i-1}}{\sigma_{i-1}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.16)$$

### 4.2.3 Estimaciones de los parámetros $\sigma$ y reversión a la media

Insertando los valores de las temperaturas observadas en la diferentes regiones dentro de las ecuaciones (4.13) y (4.14), se obtienen a las estimaciones de  $\sigma$  listadas en las Tablas 4.2 y 4.3. Como era de esperarse, las variaciones que se muestran en las  $\sigma$  estimadas oscilan diferente para cada región, esto se le puede atribuir probablemente al fenómeno de El Niño, ya que en cada región afecta en diferente época del año, por lo cual para algunos meses se observan variaciones altas en las estimaciones de  $\sigma$ .

Mes	Estimación 1	Estimación 2	Promedio
Enero	0.40	0.53	0.46
Febrero	0.44	0.62	0.53
Marzo	0.60	0.74	0.67
Abril	0.64	0.73	0.68
Mayo	0.81	0.61	0.71
Junio	0.71	0.61	0.66
Julio	0.45	0.51	0.48
Agosto	0.36	0.50	0.43
Septiembre	0.38	0.61	0.49
Octubre	0.80	0.58	0.69
Noviembre	1.02	0.65	0.84
Diciembre	0.76	0.61	0.68

Tabla 4.2: Estimaciones de  $\sigma$  para la región del Golfo de California, obtenidas de la variación cuadrática (4.13) y de la ecuación de regresión (4.14), y el promedio de las dos.

Mes	ENS	IC	GC	CSL	PV	AC	GT
Enero	0.29	0.34	0.46	0.44	0.45	0.29	0.72
Febrero	0.35	0.38	0.53	0.37	0.41	0.32	0.74
Marzo	0.49	0.53	0.67	0.51	0.53	0.48	0.67
Abril	0.52	0.50	0.68	0.48	0.53	0.56	0.54
Mayo	0.43	0.47	0.71	0.56	0.65	0.58	0.54
Junio	0.44	0.55	0.66	0.74	0.70	0.68	0.49
Julio	0.49	0.63	0.48	0.77	0.59	0.47	0.45
Agosto	0.44	0.53	0.43	0.51	0.57	0.46	0.37
Septiembre	0.50	0.73	0.49	0.59	0.52	0.44	0.42
Octubre	0.51	0.53	0.69	0.50	0.50	0.42	0.67
Noviembre	0.52	0.48	0.84	0.55	0.49	0.37	0.67
Diciembre	0.45	0.49	0.68	0.55	0.51	0.37	0.60

Tabla 4.3: Valores promedio de  $\sigma$  de las diferentes regiones de estudio del Pacífico mexicano, donde ENS = Ensenada, IC = Isla Cedros, GC = Golfo de California, CSL = Cabo San Lucas, PV = Puerto Vallarta, AC = Acapulco y GT = Golfo de Tehuantepec.

Con los valores promedio de  $\sigma$  de la Tabla 4.3 se obtienen los parámetros de reversión a la media de las diferentes regiones de estudio. Estos parámetros se encuentran listados en la Tabla 4.4. De la Tabla 4.4 se puede observar que la rapidez con la que regresan a la media es diferente para cada región, esto se le atribuye (de nuevo) al fenómeno de El Niño, ya que para las regiones que son más afectadas por El Niño, el parámetro de reversión resulto ser más pequeño que en las regiones donde El Niño no afecta de la misma forma (ver Figura 1.1 y 4.5).

Región	Parámetro $a$
Ensenada	0.103
Isla Cedros	0.070
G. California	0.075
Cabo San Lucas	0.116
Pto. Vallarta	0.143
Acapulco	0.233
G. Tehuantepec	0.278

Tabla 4.4: Parámetros de reversión a la media  $a$  estimados a partir de (4.15) para las diferentes regiones de estudio.

El que una señal (en este caso de temperatura) presente un valor pequeño en su reversión a la media, significa que le tomará un “mayor tiempo” en volver a su nivel de equilibrio. En este caso, para las regiones que se ven más afectadas por el fenómeno de El Niño, en su señal de temperatura presentan un mayor ruido, como el que se muestra en la Figura 4.5, lo cual ocasiona que le tome “mayor tiempo” a la señal en volver a su nivel de equilibrio y por consiguiente obtener un valor pequeño en su parámetro de reversión a la media.

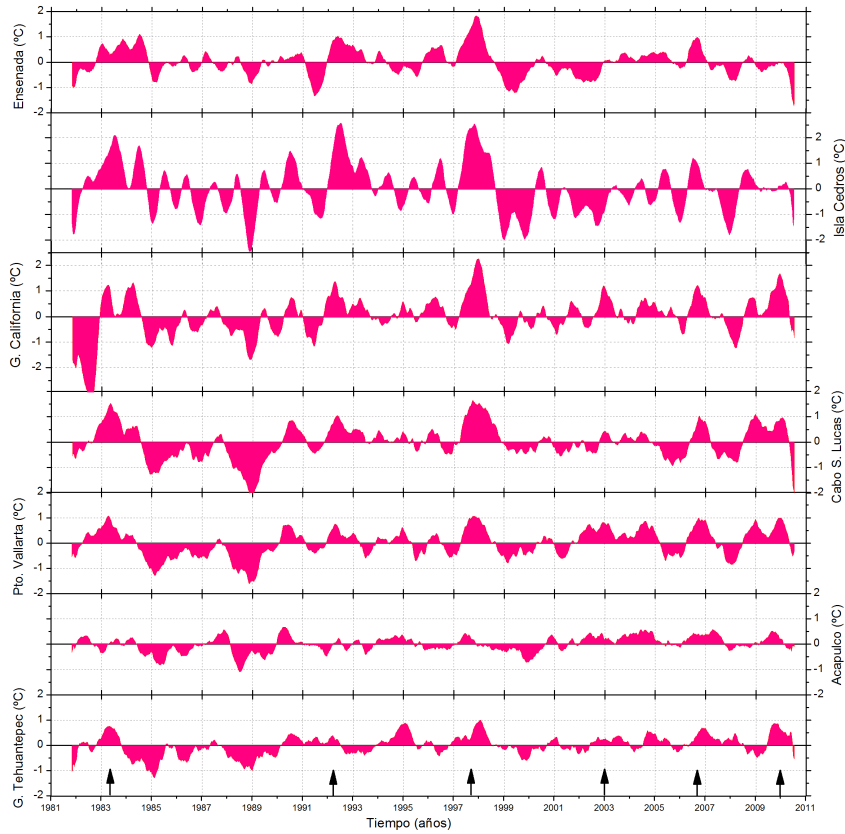


Figura 4.5: Anomalías (ruido) que se presentan en la temperatura en las diferentes regiones del Pacífico mexicano obtenidas a partir del residual entre los datos de temperatura y el modelo determinista. Las flechas indican eventos del fenómeno de El Niño. Datos obtenidos de IRI/LDEO (2010).

### 4.3 Simulación de trayectorias de la Temperatura del mar

Habiendo estimado todos los parámetros desconocidos del modelo de temperatura (4.11)-(4.13), podemos proceder a simular las trayectorias del proceso de Ornstein-Uhlenbeck (OU) haciendo uso del modelo de simulación Monte Carlo. Para llevar a cabo la simulación del proceso, se necesita encontrar a partir de (4.11) una ecuación en tiempo discreto, similar a lo realizado en la sección 2.3.2. Resolviendo la integral en (4.12) entre  $s$  y  $t$ , con  $t > s$  se obtiene lo siguiente; Dagpunar (2007):

$$T_t = (T_s - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_s^m + \sigma\mu\sqrt{\frac{1 - e^{-2a(t-s)}}{2a}}W_{(s,t)} \quad (4.17)$$

donde  $\{W_{(s,t)}\}$  son variables aleatorias independientes para intervalos discontinuos  $\{(s,t)\}$ . Finalmente, para simular un proceso de OU en el intervalo  $\Delta t$ , se obtiene que:

$$T_{t+1} = (T_t - T_t^m)e^{-a\Delta t} + T_t^m + \sigma\mu\sqrt{\frac{1 - e^{-2a\Delta t}}{2a}}\epsilon_t \quad (4.18)$$

donde  $\epsilon_t$  es un número procedente de una distribución  $N(0, 1)$ , los cuales fueron generados a partir del método Ziggurat visto en la Sección 2.3.2. Por lo tanto, haciendo uso de la ecuación (4.18), en la Figura 4.6 se muestra una posible trayectoria de la temperatura durante los siguientes años para la región del Golfo de California. Comparando esta simulación con las temperaturas reales graficadas en la Figura 4.2, se puede concluir (al menos visualmente), que el modelo de la temperatura (4.11)-(4.13) tiene las mismas propiedades que las temperaturas observadas. Sin embargo, la trayectoria simulada presenta un poco de más ruido que las temperaturas observadas en la Figura 4.2, esto puede ser debido a que (de acuerdo a las resultados mostrados en la Tabla 4.2) la estimación de  $\sigma$  promedio resulto ser mayor que la que se presenta en la serie original.

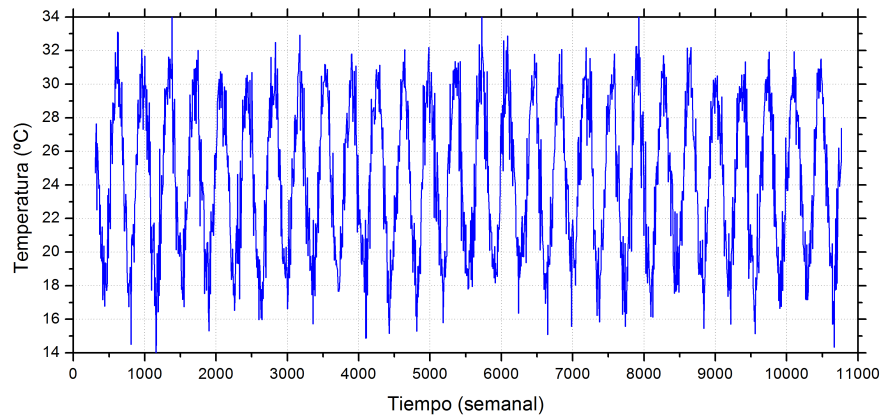


Figura 4.6: Una trayectoria del proceso de Ornstein-Uhlenbeck de la región del Golfo de California que sera usada para modelar la temperatura.

## **Conclusión capitular**

En este capítulo se muestra la dinámica estocástica que debe poseer la temperatura del mar para diferentes regiones del Pacífico mexicano, suponiendo que la variación cuadrática de la temperatura del mar es una función constante por segmentos.

Además se considera que el proceso que describe a la temperatura del mar debe tener la propiedad de reversión a la media. Se señala que un proceso de Ornstein-Uhlenbeck posee esta propiedad y es adecuado para describir la evolución de la temperatura del mar para después poder realizar la simulación de trayectorias y llevar a cabo la valuación de las opciones climáticas.

## 5 Cálculo del Precio del Derivado Climático

El mercado para los derivados climáticos es un típico ejemplo de un mercado incompleto, y más aun en el mercado de los derivados en México, ya que se trata de un mercado joven debido a que la creación del mercado de derivados listados en México inició en 1994 hasta su inicio formal de operaciones el 15 de diciembre de 1998, a través de la Bolsa de Derivados de México conocida como MexDer (Mercado Mexicano de Derivados, S.A. de C.V.).

Decimos que el mercado de los derivados climáticos es un mercado incompleto debido a que la temperatura no es negociable. Por lo tanto, se tiene que considerar un precio de riesgo de mercado para poder obtener el precio de dichos contratos.

### 5.1 El Precio de riesgo de mercado

Como aun no existe un mercado de derivados climáticos donde se utilice como índice la temperatura del mar y del cual se puedan obtener los precios de dichos contratos, se asume por simplicidad que el precio de riesgo de mercado  $\lambda$  es constante. Además, se asume dar un activo libre de riesgo con tasa de interés constante  $r$  y un contrato que por cada grado Celsius paga una determinada cantidad monetaria; Alaton, Djehiche y Stillberger (2002). Así, bajo una medida martingala  $\mathbb{Q}$ , caracterizada por el precio de riesgo de mercado  $\lambda$ , el proceso para el precio, denotado por  $T_t$ , debe satisfacer la siguiente dinámica:

$$dT_t = \left\{ \frac{dT_t^m}{dt} + a(T_t^m - T_t) - \lambda\sigma_t \right\} dt + \sigma_t dV_t \quad (5.1)$$

donde  $(V_t, t \geq 0)$  es un proceso de  $\mathbb{Q}$ -Wiener. Así, el precio de un derivado esta expresado como un valor esperado descontado bajo la medida martingala  $\mathbb{Q}$ , por lo tanto, de acuerdo a lo presentado por Alaton, Djehiche y Stillberger (2002) se calcula el valor esperado y la varianza de  $T_t$  bajo la medida  $\mathbb{Q}$  como sigue:

$$E^{\mathbb{Q}}[T_t | \mathcal{F}_s] = (T_s - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_t^m - \frac{\lambda\sigma_i}{a}(1 - e^{-a(t-s)}) \quad (5.2)$$

$$\text{Var}[T_t|\mathcal{F}_s] = \frac{\sigma_i^2}{2a}(1 - e^{-2a(t-s)}) \quad (5.3)$$

Entonces, para simular trayectorias de la temperatura bajo el riesgo neutral en la medida  $\mathbb{Q}$ , solo debemos agregar el término del precio de riesgo de mercado a las ecuaciones (4.17) y (4.18) para poder llevar a cabo la simulación del proceso. Por lo tanto, haciendo uso de la ecuaciones (5.2) y (5.3) para simular un proceso de Ornstein-Uhlenbeck (OU) bajo el riesgo neutral en la medida  $\mathbb{Q}$ , con  $t > s$  obtenemos lo siguiente:

$$T_t = (T_s - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_t^m - \frac{\lambda\sigma_\mu}{a}(1 - e^{-a(t-s)}) + \sigma_\mu\sqrt{\frac{1 - e^{-2a(t-s)}}{2a}}W_{(s,t)} \quad (5.4)$$

donde  $\{W_{(s,t)}\}$  son variables aleatorias independientes para intervalos discontinuos  $\{(s, t)\}$ . Y para simular un proceso de OU en el intervalo  $\Delta t$ , se obtiene que:

$$T_{t+1} = (T_t - T_t^m)e^{-a\Delta t} + T_{t+1}^m - \frac{\lambda\sigma_\mu}{a}(1 - e^{-a\Delta t}) + \sigma_\mu\sqrt{\frac{1 - e^{-2a\Delta t}}{2a}}\epsilon_t \quad (5.5)$$

donde  $\epsilon_t$  es un número procedente de una distribución  $N(0, 1)$ , los cuales fueron generados utilizando el método de Ziggurat visto en la sección 2.3.2.

Antes de calcular algún precio usando el método de simulación Monte Carlo, primero se debería encontrar el parámetro  $\lambda$  de acuerdo a las condiciones del mercado observando los precios de algunos contratos. Sin embargo, desafortunadamente aun no existe un desarrollo de mercado de derivados climáticos donde se utilice como índice la temperatura del mar, por lo que asumiremos que el precio de riesgo de mercado  $\lambda$  es una cantidad constante para la cual se tomaran distintos valores a fin obtener el precio de las diferentes opciones que se propongan de ejemplo en el trabajo.

## 5.2 Aplicación del Modelo al Sector Pesquero

La aplicación del modelo se centra particularmente en la pesquería de Sardina ubicada en la región del Golfo de California (ver Figura 4.1), debido a que además de ser una de las pesquerías de mayor volumen de producción y presencia económica en México, también es una de las pesquerías que reciente notablemente las anomalías de la temperatura del mar, como es el fenómeno de El Niño (ver Capítulo 1).

Como no existe un desarrollo completo en el mercado de derivados donde se utilice como índice la temperatura del mar, para poder estimar el precio de las opciones climáticas para el caso de la pesquería de Sardina, se necesitan tomar algunos supuestos para determinar (además del precio de mercado  $\lambda$ ) un nivel de temperatura de referencia  $T_0$ , un nivel de ejercicio  $K$  y un valor del nominal  $\alpha$ .



### 5.2.1 Temperatura de Referencia

Como se menciona anteriormente, la temperatura de referencia para los derivados climáticos que toman como índice la temperatura del ambiente es de  $18^{\circ}\text{C}$  para los contratos que se cotizan en los Estados Unidos y algunos países de Europa. En este caso como se trata de la temperatura del mar, no se cuenta con un nivel de referencia fijo o usual, debido a la falta de un mercado de derivados completo, sin embargo este parámetro puede ser acordado en el contrato, en el cual se puede establecer la temperatura de referencia bajo la cual se resulta afectado y así poder obtener cobertura contra las anomalías en la temperatura del mar, como podría ser la presencia del fenómeno de El Niño.

Al tratarse el caso particular de la pesquería de Sardina se propone que la temperatura de referencia para el diseño de una opción call HDW (de sus siglas en inglés *heating degree-week*) en la región del Golfo de California para la pesquería de Sardina sea de  $20^{\circ}\text{C}$ , esto debido a que la sardina prefiere temperaturas en el intervalo de un  $17$  a  $20^{\circ}\text{C}$  (con una preferencia especial de  $18^{\circ}\text{C}$ ), ya que al aumentar la temperatura al menos  $3^{\circ}\text{C}$  por encima de este intervalo el porcentaje de mortandad puede incrementarse hasta en un  $40\%$ ; Hernández y Barón (2009). Por otro lado, como la temperatura promedio mínima en la región del Golfo de California es de aproximadamente  $18^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 4.2), esta resulta muy conveniente por encontrarse dentro del intervalo preferencial de la sardina.

### 5.2.2 El Nominal

Otro valor que se debe encontrar debido a este mercado de derivados incompleto es el nominal  $\alpha$ , el cual (en este caso) corresponde a la cantidad de dinero que el tenedor o comprador del call recibe por cada *grado-semana* (HDW o CDW de sus siglas en inglés *heating degree-week* y *cooling degree-week* respectivamente) que se encuentre por encima del nivel de ejercicio  $K$  durante el periodo del contrato. Por esta razón, para poder obtener una estimación del nominal  $\alpha$ , se propone analizar para el caso particular de la pesquería de Sardina la variación del volumen de producción en peso vivo (ver gráfica de la Figura 5.1) contra la temperatura del mar del Pacífico mexicano para el período de 1984-2008. Como se menciona anteriormente, esta pesquería reciente notablemente las anomalías en la temperatura del mar, por lo tanto creemos que un *análisis de regresión lineal* nos puede proporcionar una estimación de la variación del volumen de producción por cada grado de temperatura del mar, y así obtener un valor del nominal  $\alpha$ .

El periodo utilizado para el análisis de regresión lineal que se muestran en la Figura 5.2 es anual debido a que existen temporadas de veda para la pesquería durante el año; OEIDRUS Sonora (2005). Sin embargo, debemos tener presente estos periodos de veda, ya que es importante para no considerarlos dentro del periodo del contrato de la opción. La Tabla 5.1 muestra la estimación de la pendiente obtenida para el caso de la pesquería de Sardina.

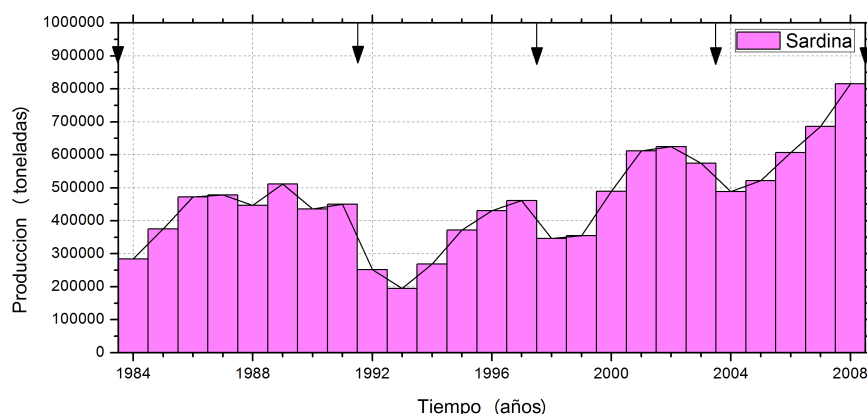


Figura 5.1: Volumen de producción anual en peso vivo de la pesquería de Sardina en litoral del Pacífico. Las flechas indican eventos del fenómeno de El Niño que se han presentado. Datos obtenidos de SAGARPA (1984-2008).

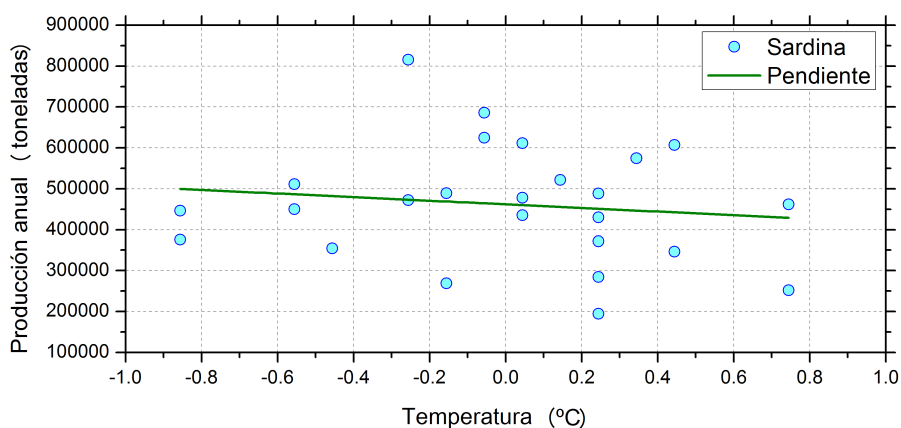


Figura 5.2: Gráfica de regresión lineal de la variación del volumen de producción anual en peso vivo de la pesquería de Sardina contra la temperatura del mar del Pacífico mexicano para el período de 1984-2008. Datos obtenidos de SAGARPA (1984-2008), Reynolds, Rayner, Smith, Stokes y Wang (2002) y IRI/LDEO (2010).

Producción	Pendiente $a$ (toneladas/°C)	Intersección $b$ (toneladas)
$Y = aX + b$	-44116.86	462208.30

Tabla 5.1: Parámetros obtenidos a partir del análisis de regresión lineal. Y representa el vector de la serie de producción y X es el vector de la serie de temperaturas de la región del Golfo de California.

De acuerdo a los datos de la región del Golfo de California, las temperaturas más bajas se registran en los meses de Diciembre a Marzo, siendo este periodo preferencial para la Sardina, ya que como sabemos prefiere temperaturas entre 17 a 20 °C; sin embargo, observando los niveles de producción histórica para determinados meses, los volúmenes más altos se registran en el mes de Marzo. Para dicho mes, en presencia de El Niño, los niveles de producción se reducen notablemente respecto al año anterior, en donde no existe la presencia de este fenómeno.

Entonces, a partir de la estimación mostrada en la Tabla 5.1, se puede suponer que al existir un aumento en la temperatura del mar, la producción de Sardina de un año respecto a otro durante el periodo de un mes (en el caso de Marzo, por ejemplo Marzo 2010 respecto Marzo 2011) se reducirá en 44,000 toneladas por grado centígrado que aumente la temperatura durante dicho mes. Así, podemos sugerir que para un contrato con un periodo de cuatro semanas correspondientes al mes de Marzo de 2011 el valor nominal sea de 11,000 *ton/HDW*, el cual a precios de 2008 publicados por SAGARPA (2008) adquiere un valor aproximado de MX\$6,000,000 *pesos/HDW*. El valor del nominal que se propone es debido a que se estima que la temperatura del mar aumentara debido a la presencia de alguna anomalía (por ejemplo el fenómeno de El Niño) en 1 °C como mínimo para el periodo de un mes (ver Figura 4.5).

### 5.2.3 Especificaciones de los contratos

Sabemos que el nivel de ejercicio  $K$  puede ser acordado dentro del contrato, sin embargo, como en este trabajo deseamos calcular el precio de una opción, se proponen algunos valores para este parámetro.

Como el nivel de ejercicio  $K$  se encuentra directamente relacionado con el período del contrato, se propone que para un período de cuatro semanas correspondientes al mes de Marzo de 2011 el valor del nivel de ejercicio sea de 4 *HDW*. Esto debido a que podemos suponer que en cada semana se supera como mínimo en 1 °C la temperatura de referencia  $T_0$  ya que durante cuatro semanas la temperatura del mar aumenta en promedio 1 °C bajo la presencia de alguna anomalía en la temperatura (ver Figura 4.5); si el período del contrato es de cuatro semanas, entonces se están acumulando como mínimo 4 *HDW*, por lo tanto, a partir de este valor se calculan los precios de las opciones climáticas para el mes de Marzo. Las especificaciones para contratos de opciones call *HDW* se encuentran listados en la Tabla 5.2.

Usando el modelo que se presenta aquí y utilizando un valor de  $\lambda = 0$  y con un valor de  $K = 4$  *HDW* para el mes de Marzo, podemos obtener así los niveles de ejercicio para los meses de Enero y Febrero, debido a que al tener la misma  $\lambda$  podemos forzar a que la precio de los contratos para dichos meses sea similar al precio del contrato del mes de Marzo. Así, los valores obtenidos para los niveles de ejercicio en Enero y Febrero se muestran en la Tabla 5.2.

Parámetro	Opción I	Opción II	Opción III
Región	G. de California	G. de California	G. de California
Índice	HDW	HDW	HDW
Tipo	Call	Call	Call
Período	Enero 2011	Febrero 2011	Marzo 2011
Tasa libre de riesgo $r$	5 %	5 %	5 %
Nivel de Ref. $T_0$	20 °C	20 °C	20 °C
Ejercicio $K$	5.28 <i>HDW</i>	7.35 <i>HDW</i>	4.00 <i>HDW</i>
Nominal $\alpha$	6,000,000 MX\$/ <i>HDW</i>	6,000,000 MX\$/ <i>HDW</i>	6,000,000 MX\$/ <i>HDW</i>

Tabla 5.2: Especificaciones de tres opciones call *HDW* para la pesquería de Sardina. MX\$ = pesos mexicanos.

Se debe tener en cuenta que estamos manejando datos semanales, lo cual ocasiona que la acumulación de  $HDW$  y  $CDW$  sea pequeña en relación a la acumulación de  $HDD$  y  $CDD$  que se tratan en las opciones de temperatura comunes, por lo tanto el nivel de ejercicio  $K$  no puede llegar a tener un valor muy alto, debido a que si el periodo del contrato (por ejemplo de un mes) solo se necesitará la acumulación de  $HDW$  y  $CDW$  de aproximadamente cuatro semanas.

### 5.3 Resultados y Discusión

Para realizar el cálculo del precio de la opción climática se propone utilizar el método de simulación Monte Carlo, debido a que no existe una fórmula cerrada similar a la propuesta por Black-Scholes. Recordemos que el método de simulación Monte Carlo es una técnica con la cual podemos calcular numéricamente el valor esperado (ver Sección 2.3.2).

Para llevar a cabo la simulación Monte Carlo, los números aleatorios de distribución normal se generaron utilizando la función interna *randn* del software de programación MATLAB en su versión 7.6.0, debido a que el algoritmo Ziggurat ha sido utilizado por MATLAB desde su versión 5.0. MATLAB puede generar cerca de 10 millones de números aleatorios de alguna distribución en menos de un segundo, teniendo un período de repetición de  $2^{64}$ . Así en 10 millones de desviaciones normales por segundo, a MATLAB le tomará aproximadamente 58,000 años antes de se repita una misma serie de números aleatorios; Moler (2004).

Debido a que al hacer uso del algoritmo zigurat la generación de números aleatorios distribuidos uniformemente es más rápida, se utilizaron 100,000 trayectorias para la simulación, obteniendo como resultado las primas (en pesos correspondientes al año 2008) de las diferentes opciones (ver Tabla 5.2) listadas en la Tabla 5.3 para diferentes valores de  $\lambda$ .

Debe notarse que se ha omitido el pago máximo. Estas opciones son solamente unos ejemplos de derivados para los cuales pudimos calcular sus precios, aunque también probablemente son opciones muy similares a las que pueden ser negociadas en el mercado.

Valor $\lambda$	Opción I	Opción II	Opción III
$\lambda = 0.00$	3.3	3.3	3.3
$\lambda = 0.01$	3.8	3.8	3.8
$\lambda = 0.02$	4.4	4.4	4.4
$\lambda = 0.025$	4.7	4.8	4.7
$\lambda = 0.05$	6.4	6.6	6.5
$\lambda = 0.075$	8.4	8.9	8.7
$\lambda = 0.10$	10.8	11.6	11.2

Tabla 5.3: Precio a valor presente (en millones de pesos) de las opciones climáticas mostradas en la Tabla 5.2.

Usualmente el comprador de una opción climática paga una prima al vendedor que se encuentra típicamente entre el 10 y 20 % del valor nominal del contrato. Podemos observar a partir de la

Tabla 5.3 que para valores de  $\lambda = 0, \dots, 0.025$  las primas de la opciones se encuentran entre el 14 y 20 % del valor del notional del contrato (el cual es de MX\$ 24,000,000 pesos).

Sin embargo, la prima de una opción climática puede variar significativamente dependiendo del perfil de riesgo del contrato. Como se puede notar en los resultados mostrados en la Tabla 5.3, los precios obtenidos aquí son muy dependientes del parámetro  $\lambda$ , ya que para valores de  $\lambda > 0.025$  las primas de las opciones aumentan significativamente de precio debido a que el riesgo varía dependiendo del período del contrato. Podemos observar que para la Opción II correspondiente al mes de Febrero, el valor del prima es mayor al de las opciones I y III, lo cual nos dice que al aumentar el precio de riesgo de mercado la probabilidad de pérdida durante este período es mayor.

Debemos notar que para obtener una prima de la opción menor al 14 % del valor notional del contrato, el valor de  $\lambda$  debe tener signo negativo ( $\lambda < 0$ ). Esto es debido posiblemente a la falta de un mercado completo de derivados climáticos donde se utilice como índice fundamental la temperatura del mar, ya que resulta difícil encontrar una forma de calibrar el modelo para determinar un valor adecuado del nivel de ejercicio  $K$  y así poder encontrar un mejor parámetro del precio de riesgo de mercado con el cual los precios de las primas de las opciones climáticas mostradas aquí se encuentren dentro del intervalo típico del 10 al 20 % del valor notional del contrato.

Por otro lado, que el precio de las primas de las opciones de la Tabla 5.2 para valores de  $\lambda > 0$  sea mayor al 14 % del valor notional del contrato es debido quizás al tipo de cobertura del cual tratan las opciones mostradas aquí, ya que esto es debido posiblemente a la sensibilidad del producto (en este caso la producción de Sardina) ante la variabilidad de la temperatura del mar.

## Conclusión capitular

Dentro de este capítulo se señalan las especificaciones que deben tener los contratos de las opciones climáticas para el sector pesquero, además de mostrar el cálculo del precio de la opción y las consideraciones tomadas para obtener los parámetros del precio de riesgo de mercado, la temperatura de referencia, el valor del nominal y el nivel referencia que se muestran dentro las especificaciones de los contratos de opciones.

En este capítulo también se muestran los resultados obtenidos para el precio de las opciones climáticas, las cuales dependen fuertemente del parámetro del precio de riesgo de mercado. Además en la discusión podemos observar que los precios obtenidos para diferentes precios de riesgo de mercado se encuentran dentro del intervalo típico del 10 al 20 % del valor notional del contrato, lo cual nos muestra que los precios obtenidos aquí en buena medida están de acuerdo a los precios que se observan en el mercado de derivados climáticos.

## Conclusiones

En el presente trabajo se ha propuesto las características, especificaciones y los precios que puede tener un derivado climático, específicamente una opción climática, la cual utilice como variable fundamental la temperatura del mar del Pacífico mexicano para así obtener cobertura contra la caída en la producción pesquera debida al aumento en temperatura del mar ocasionado por el fenómeno natural de El Niño. Se puede observar que las primas de las opciones mostradas aquí se encuentran dentro del intervalo típico del 10 al 20% del valor nominal del contrato dentro del cual el comprador de una opción climática paga el valor de esa prima. Se debe notar que las primas de las opciones aumentan significativamente de precio debido a que el riesgo varía dependiendo del valor del precio de riesgo de mercado y del período del contrato, además de que esto es debido posiblemente a la sensibilidad del producto (en este caso la producción de Sardina) ante la variabilidad de la temperatura del mar.

También se ha propuesto un modelo para entender la dinámica de la temperatura promedio semanal del mar, tomando como referencia estudios previos sobre derivados climáticos, en donde utilizan como índice fundamental la temperatura del ambiente. En las secciones anteriores, se ha explicado porque un proceso con reversión a la media y una combinación de comportamiento periódico y estocástico es adecuado; aunque este modelo de temperatura es una simplificación del mundo real, se puede observar que el modelo se ajusta en buena forma a los datos empíricos de la temperatura del mar. Uno podría incluir en el modelo un mejor ajuste del ruido considerando una volatilidad estocástica y así poder encontrar un modelo más realista.

Debido a que aun no existe un mercado de derivados donde se utilice como índice la temperatura del mar, resulta difícil poder encontrar una mejor descripción para estimar el valor del precio de riesgo de mercado en la práctica. Seguramente con el desarrollo del mercado de derivados climáticos, se podrá incluir una mejor dinámica para el precio de riesgo de mercado.

Es importante también tomar en cuenta que el valor del nominal es un parámetro que se debe considerar debido a que este muestra como varía el volumen de producción de la especie con respecto a la temperatura del mar, por lo cual se vuelve un claro indicador de las pérdidas para el caso particular del Sector Pesquero. Aunque sabemos que el valor del nominal puede ser acordado en el contrato, debemos recordar que no existe un desarrollo del mercado de derivados donde se utilice como índice la temperatura del mar, lo cual vuelve más complicado la estimación de este valor. Por esta razón, se puede observar que el valor del nominal se tomó por igual para las diferentes opciones consideradas en éste trabajo. El valor del nominal

mostrado aquí adquiere esa cantidad debido a que se considera que es la pérdida que se tiene al incrementar la temperatura del mar  $1^{\circ}\text{C}$  por semana, ya que al término de un mes el valor promedio de la temperatura debe ser como mínimo  $1^{\circ}\text{C}$ .

Aun no existe ningún antecedente teórico o práctico donde se utilicen opciones climáticas que usen como índice fundamental la temperatura del mar, este tipo de opciones deben surgir para cubrir una necesidad en el mercado, es decir, el mercado las debe solicitar. En el caso de las pesquerías, el mercado podría solicitarlas para cubrir sus pérdidas económicas ante la baja en el volumen de producción pesquera debido a las anomalías que se presentan en la temperatura del mar, y así poder evitar tanto desempleos como también la sobreexplotación de recursos pesqueros en las regiones que sean más afectadas por dichas anomalías en la temperatura, debido a que la presencia de fenómenos como El Niño afectan enormemente estos dos ámbitos. Posiblemente en el futuro, con un desarrollo más completo en el área de derivados climáticos, el mercado solicite este tipo de instrumentos para cubrirse contra anomalías en la temperatura del mar.

Aunque las anomalías que se presentan en la temperatura del mar afectan directamente los volúmenes de producción pesquera, se debe considerar la existencia de derivados climáticos donde se utilice como índice fundamental la temperatura del mar, debido a que dichas anomalías como la ocurrencia del fenómeno de El Niño no solo afectan a la temperatura del mar, sino que también como se ha mostrado en estudios previos para el caso de México, se afecta a la temperatura del ambiente; Magaña (2004), reduce la cantidad de lluvia en el sur de México y aumenta en el norte país; Bravo (2010), los ciclones tropicales disminuyen en el océano Atlántico y permanece invariante en el Pacífico; Reyes y Troncoso (1998). Todas estas variaciones climáticas que se observan año con año son en gran medida ocasionadas por fenómenos naturales como El Niño afectando no solo al sector pesquero, sino también al sector agrícola y pecuario; Magaña (2004). Posiblemente más adelante se puede plantear un panorama en el cual se analicen los impactos del fenómeno de El Niño en los sectores agrícola y pecuario y se modele un sistema de cobertura usando derivados climáticos donde se utilice como índice la temperatura del mar. Por este motivo, la existencia de este tipo de opciones climáticas mostradas en este trabajo, pueden ser de mayor utilidad para la cobertura contra un mal clima, debido a que las anomalías que se presentan en la temperatura del mar afectan directamente en mayor medida al medio ambiente, cambiando el pronóstico sobre índices fundamentales como el de la temperatura, la lluvia y la nieve, los cuales son índices muy usados en los derivados climáticos que se comercian actualmente.

# Bibliografía

- Alaton, P., Djehiche, B. y Stillberger, D. (2002). On modeling and pricing weather derivatives, *Applied Mathematical Finance* 9(1): 1-20.
- Augros, J.C. y Navatte, P. (1987). *Bourse. Les Options négociables*, Vuibert Gestion, París, cap 2.
- Baqueiro C., E. y Sinha, T. (2005). *Seguros de lluvia mediante el uso de derivados*, Tesis.
- Basawa, I. V. y Prasaka Rao, B. L. S. (1980). *Statistical Inference for Stochastic Process*, Academic Press.
- Benth, F. E., Härdle, W. K. y López C., B. (2009). Pricing of Asian temperature risk, *SFB649 Working Paper, Humboldt-Universität zu Berlin*.
- Benth, F. E. y Šaltytė-Benth, J. (2005). Stochastic Modelling of Temperature Variations with a View Towards Weather Derivatives, *Applied Mathematical Finance* 12(1): 53-85.
- Benth, F. E. y Šaltytė-Benth, J. (2007). The volatility of temperature and pricing of weather derivatives, *Quantitative Finance* 7(5): 553-561.
- Bibby, B.M. y Sørensen, M. (1995). Martingale estimation functions for discretely observed diffusion processes, *Bernoulli* 1(1/2): 17-39.
- Black, F. y Scholes, M. (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities, *Journal of Political Economy*: 637-654.
- Boyle, P. (1977). Options: A Monte Carlo Approach, *Journal of Financial Economics*: 323-338.
- Bravo C., J.L., Azpra R., E., Zarraluqui S., V., Gay G., C. y Estrada P., F. (2010). Significance tests for the relationship between “El Niño” phenomenon and precipitation in Mexico, *Geofísica Internacional* 49(4): 245-261.
- Brockwell, P. J. y Davis, R. A. (1990). *Time Series: Theory and Methods*, 2a ed. Springer.
- Cienfuentes L., J. L., Torres G., P. y Frías M., M. (2003). *El océano y sus recursos, IX. La pesca (81)*, 5a ed. (La ciencia para todos) Fondo de Cultura Económica, México, D.F..
- Cox, J.C., Ross, S.A. y Rubinstein, M. (1979). Option Pricing: A Simplified Approach, *Journal of Financial Economics*: 229-263.



- CME (2005). An introduction to cme weather products, [http://www.levow.com/SGdownload/-Commodities/CME Weather products.pdf](http://www.levow.com/SGdownload/-Commodities/CME%20Weather%20products.pdf), *CME Alternative Investment Products*.
- Dagpunar, J. S. (2007). *Simulation and Monte Carlo with applications in finance and MCMC*, John Wiley & Sons, London.
- Díaz, H.F. y Markgraf, V. (1992). *El Niño. Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*, Cambridge University Press, 476pp.
- Díaz T., J. y Venegas M., F. (2001). Política Agrícola y Contratos de Futuros: Un Modelo de Arbitraje, *Momento Económico (115)*: 2-21.
- Fernández D., J. J. y Gregorio D., M. M. (2005). Valuación Actuarial de Bonos Catastróficos para Desastres Naturales en México, *El Trimestre Económico 72(288)*: 877-912.
- García M., J.J., Sancha D., M.P., Tejero R., C. y Toscano P., D. (2000). Opciones “exóticas”, *Boletín Económico de ICE 2673* del 27 de noviembre al 3 de diciembre: 1-8.
- Hernández, M. y Barón, B. (2009). Sardina, especie indicadora de variabilidad climática, *Gaceta CICESE 136*, Todos@CICESE, Sección Ciencia y Tecnología. <http://gaceta.cicese.mx/>.
- Hull, J.C. (2006). *Options, Futures and Other Derivatives*, 6a ed. Pearson, Prentice Hall.
- Ibarra P., H. (2003). *Administración de riesgos naturales en México: un caso práctico en el diseño de un derivado climático para la agricultura*, Tesis.
- IRI/LDEO (2010), Climate Data Library, *IGOSS nmc Reyn\_SmithOIV2 weekly sst*. [http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.Reyn\\_SmithOIV2/.weekly/.sst/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.Reyn_SmithOIV2/.weekly/.sst/)
- Jewson, S. (2004). Introduction to Weather Derivative Pricing, *The Journal of Alternative Investments*: 57-64.
- Jewson, S. y Brix, A. (2005). *Weather Derivative Valuation: The Meteorological, Statistical, Financial and Mathematical Foundations*, Cambridge University Press.
- Jorion, P. (2003). *Financial Risk Manager, Handbook*, 2a ed. John Wiley & Sons, New York.
- Lamothe F., P. (2003). *Opciones Financieras y Productos Estructurados*, 2a ed. McGraw-Hill, Madrid.
- López C., B. (2003). *Valuación de Bonos Catastróficos para terremotos en México*, Tesis.
- López C., B. (2006). *Pricing Catastrophic Bonds for Earthquakes in Mexico*, Masther Tesis.
- Magaña, V., Pérez, J.L. y Conde, C. (1998). El fenómeno de El Niño y la Oscilación del sur y sus impactos en México, *Revista Ciencias 51*: 14-18.
- Magaña R., V. (ed) (2004). *Los Impactos de El Niño en México* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Secretaria de Gobernación, 229 p.

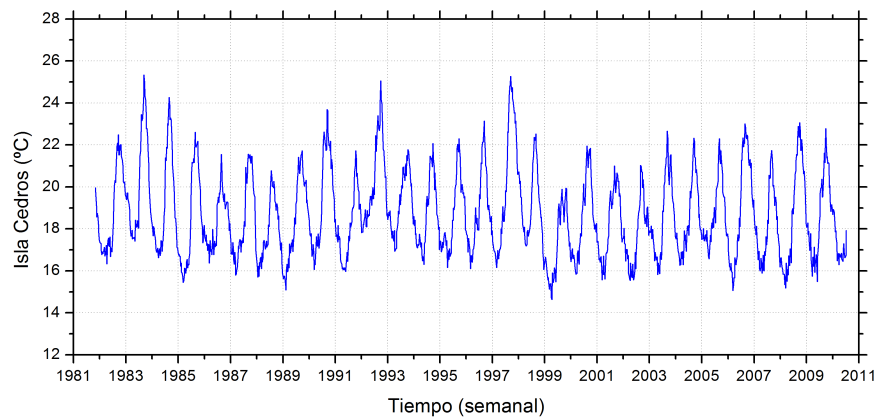
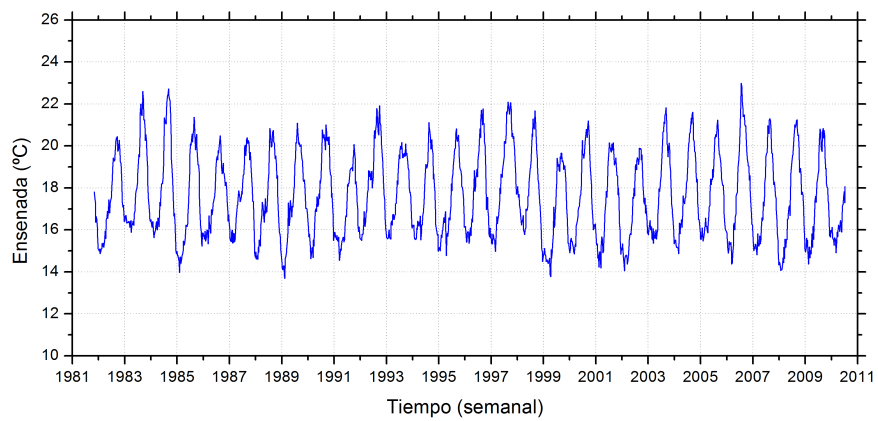
- Marsaglia, G. (1964). Generating a variable from the tail of the normal distribution, *Technometrics*, 6: 101-102.
- Marsaglia, G. y Tsang, W. W. (2000). The Ziggurat Method for Generating Random Variables, *Journal of Statistical Software*, 5(8).
- McPhaden, M. (2001). El Niño and La Niña: causes and global consequences, En: M. Cracken y J. Perry (ed), *Encyclopedia of global environmental change 1*, John Wiley & Sons, New York: 929-948.
- MexDer. Mercado Mexicano de Derivados, Opciones para obtener lo mejor de la Bolsa, *Publicaciones MexDer*, <http://www.mexder.com.mx/>.
- Moler, C. B. (2004). *Numerical Computing with MATLAB*, SIAM: 336pp, <http://www.mathworks.com/moler>.
- Myers, R. (2007). What Every CFO Needs to Know Now About Weather Risk Management, <http://www.cmegroup.com/trading/weather/>, *CME Group*.
- OEIDRUS, Sonora (2005), Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable del Estado de Sonora, *Sonora. Sector Pesquero (Aspectos Físicos y Disponibilidad de Recursos)*. <http://www.oeidrus-sonora.gob.mx/index.22.php>
- Reyes, S. y Troncoso, R. (2004). Modulación multidecenal de la lluvia en el Noroeste de Baja California, *Rev. Cienc. Mar.* 30: 99-108.
- Reynolds, R. W., Rayner, N.A., Smith, T. M., Stokes, D.C. y Wang, W. (2002). An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate, *J. Climate* 15: 1609-1625.
- Richards, T. J., Manfredo, M. R. y Sanders, D. R. (2004). Pricing Weather Derivatives, *Amer. J. Agr. Econ.* 86(4): 1005-1017.
- Ropelewsky, C.F. y Halpert, M.S. (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation, *J. Climate* 2: 268-284.
- SAGARPA (1984-2008). Secretaría de Agricultura, Gandería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, *CONAPESCA, Anuarios Estadísticos de Acuicultura y Pesca de 1984 a 2008*. [http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/cona\\_anuario\\_estadistico\\_de\\_pesca](http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/cona_anuario_estadistico_de_pesca).
- Samuelson, P.A. (1965). Rational Theory of Warrant Pricing, *Industrial Management Review* 6: 13-31.
- SEMARNAT (2009). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Compendio de Estadística Ambiental*, <http://www.semarnat.gob.mx/>.
- Trenberth, K.E. (1997). The definition of El Niño, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78: 2771-2777.
- Trujillo P., M. L. y Navarro T., R. C. (2002). *Derivados Climáticos*, Tesina.
- Venegas M., F. (2008). *Riesgos Financieros y Económicos*, 2a ed. Cengage Universitario.

- Zapranis, A. y Alexandridis, A. (2008). Modelling the Temperature Time-dependent Speed of Mean Reversion in the Context of Weather Derivatives Pricing, *Applied Mathematical Finance* 15(4): 355-386.

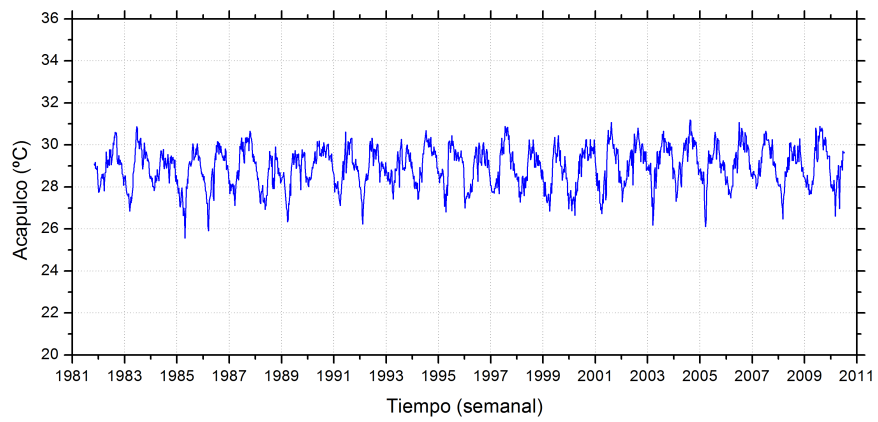
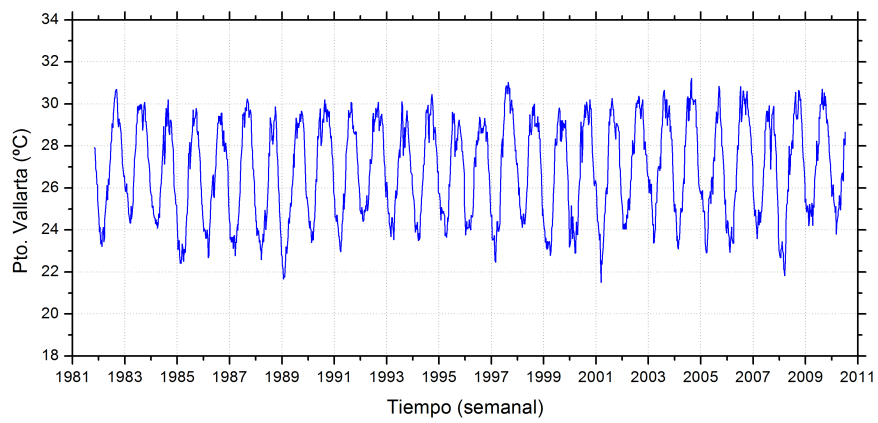
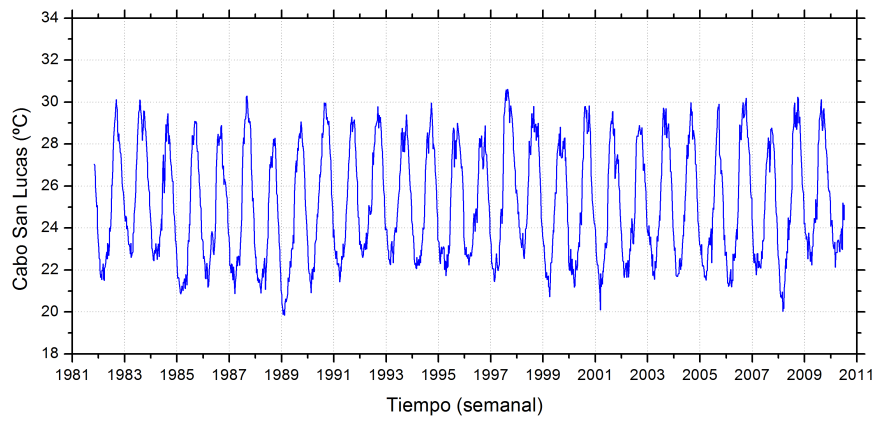
# Apéndice 1

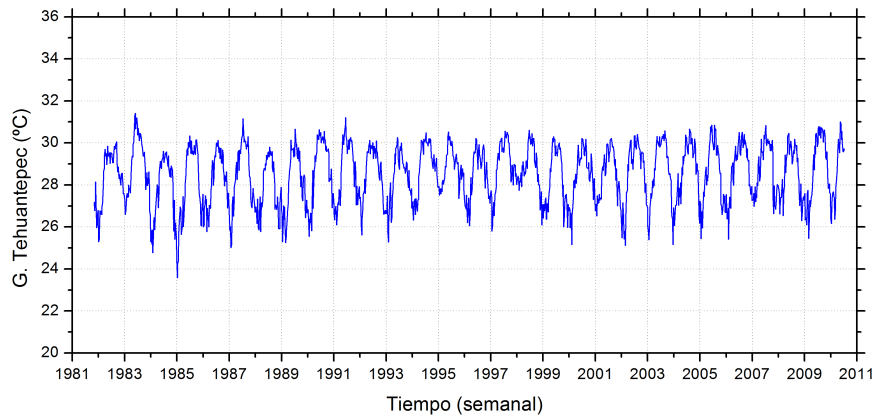
## 1.1 Gráficas de los Datos de la Temperatura del mar

A continuación se muestran las gráficas de los datos de la temperatura semanales del mar para las diferentes regiones de estudio del Pacífico mexicano.



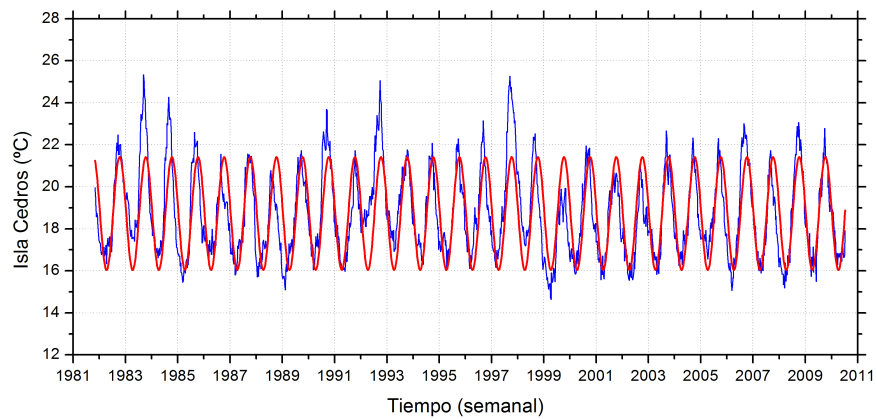
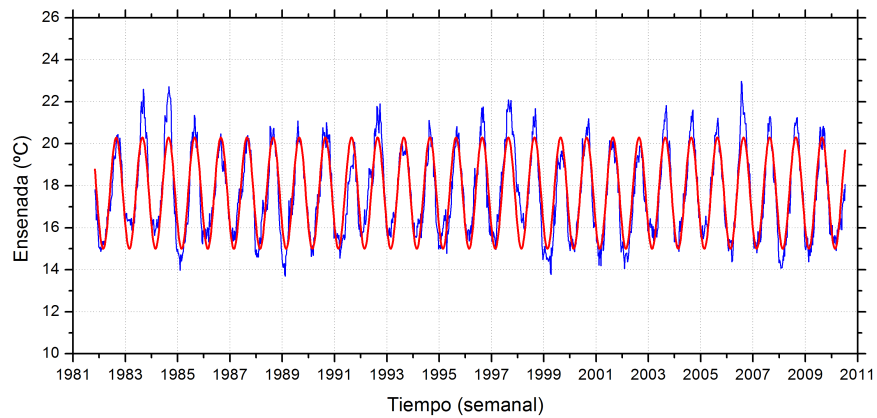
Apéndice 1



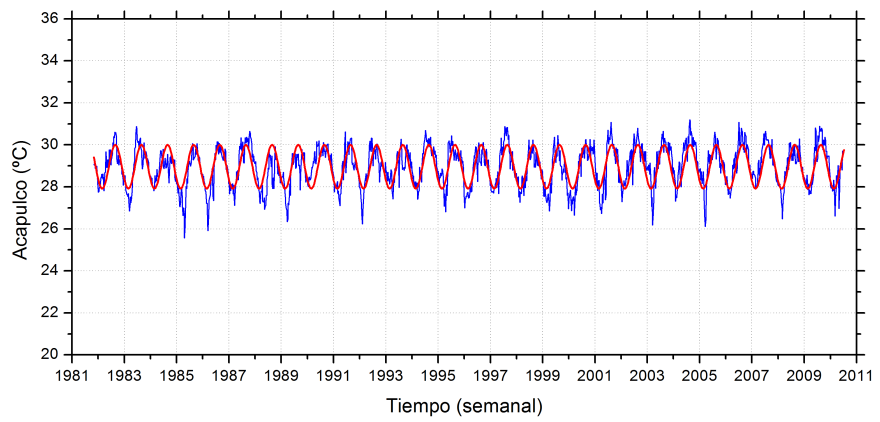
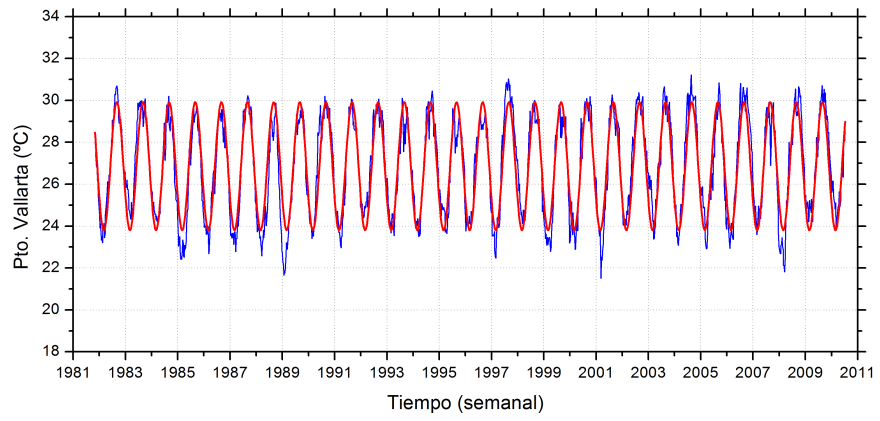
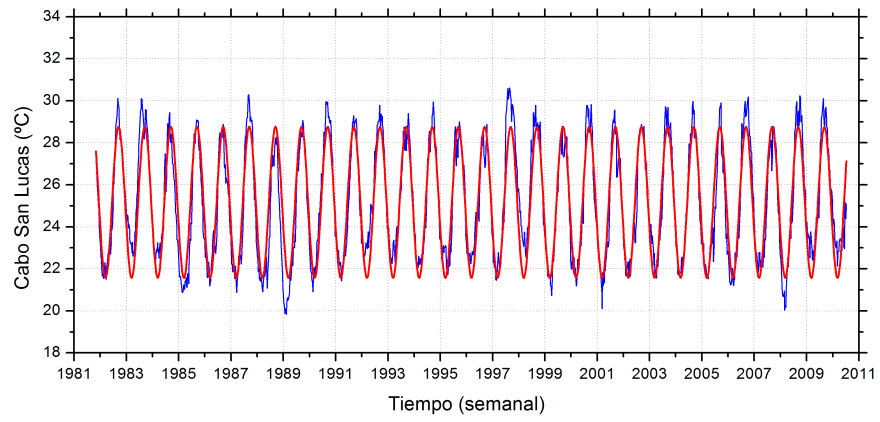


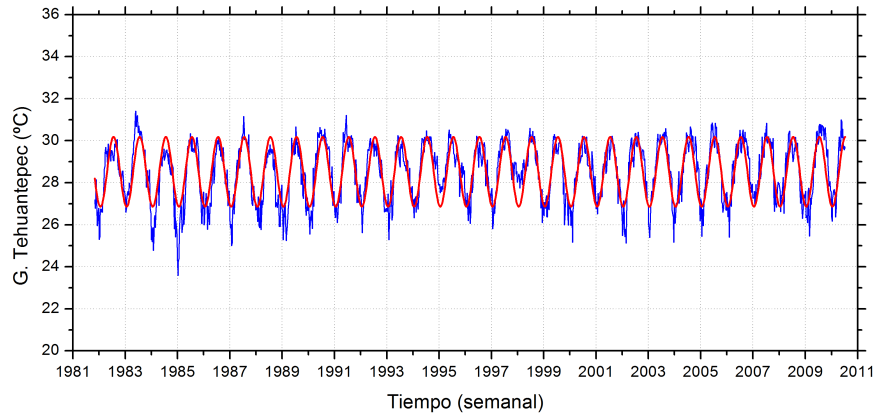
## 1.2 Gráficas del Modelo determinista para la Temperatura

Las gráficas que presentan el modelo determinista (4.1) con los parámetros de la Tabla 4.1 para cada región del Pacífico mexicano son las siguientes.



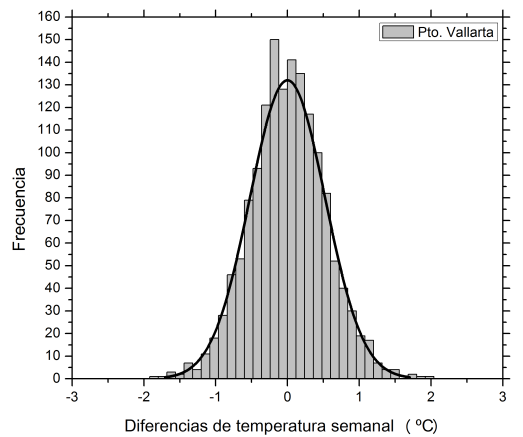
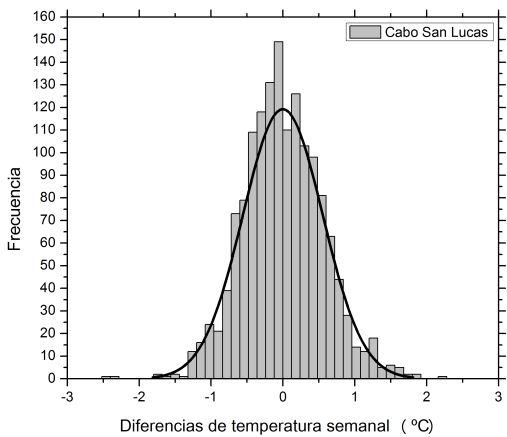
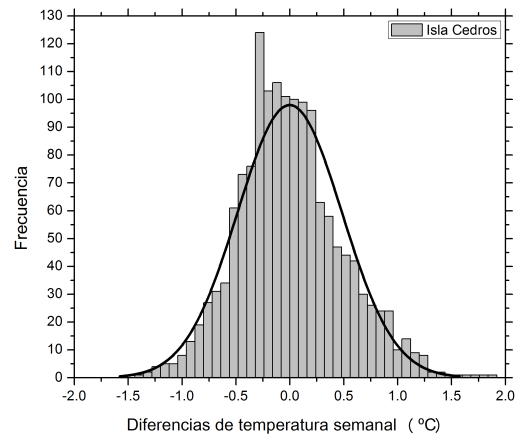
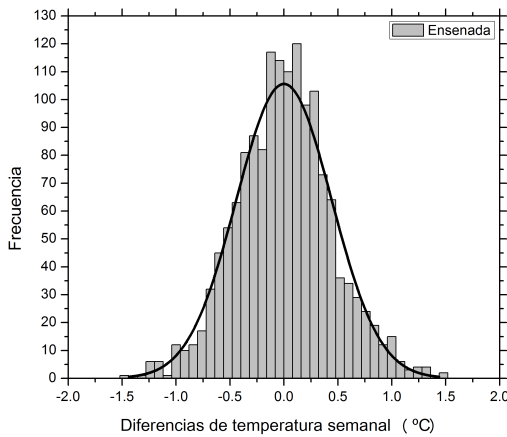
Apéndice 1





### 1.3 Histogramas de la Temperatura del mar

Los histogramas de las diferencias de temperatura para cada una de las regiones de estudio se muestran a continuación.





Apéndice 1

