

01125  
11



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO.

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CARTOGRAFIA Y ANALISIS CLIMATOLOGICO DE LA  
TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL MAR EN  
EL GOLFO DE CALIFORNIA (1996-2001).

Acompañado de Disco Compacto

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO TOPOGRAFO Y GEODESTA**  
P R E S E N T A :  
**ERIK MARQUEZ GARCIA**

DIRECTOR: ARTEMIO GALLEGOS GARCIA, Ph. D.



MEXICO, D. F.

2003

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1



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.

A mis padres por su ejemplo de vida, que sirven en mi como una gran motivación para alcanzar mis metas. Por su amor, esfuerzo y empeño dedicado a mi persona.

A mis hermanos por su impulso y animo en todo momento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **Agradecimientos:**

Quiero agradecer al Dr. Artemio Gallegos García. por su asesoramiento, sugerencias, apoyo y paciencia en la realización de este trabajo, al M en C. Ranulfo Rodríguez Sobreyra, por su apoyo en el procesamiento de las imágenes y por sus opiniones sobre este trabajo, a todos los miembros del Laboratorio de Oceanografía Física del ICML, por su impulso y amistad.

Agradezco a la UNAM y en particular a la Facultad de Ingeniería por la oportunidad de pertenecer a ella, agradezco a sus profesores por mi formación académica, y en especial a los profesores de la carrera de Ingeniería Topográfica y Geodésica por transferir sus conocimientos.

Agradezco a los Institutos de Ciencias del Mar y Limnología y al Instituto Nacional de la Pesca, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo, y por que en los últimos años han sido mi casa.

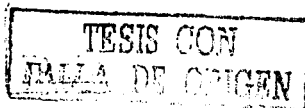
A mis compañeros y amigos por compartir parte de su vida conmigo.

Este trabajo fue realizado con el apoyo del proyecto CONACYT R32536-T, Acervo de datos Radiométricos para el Estudio de Procesos Oceánicos y de la Climatología de la Temperatura de la Superficie de los Mares de México y Aguas Adyacentes.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b><i>I.- Aspectos Generales de Cartografía y Percepción Remota.</i></b>	
Definición de cartografía.....	1
Tipos de representación cartográfica.....	2
Mapas, planos cartas.	
Mapas basados en fotografías e imágenes de satélite	
Elementos de un mapa.....	2
Proyecciones cartográficas	
Concepto de escala	
Simbología	
Interpolación	
Mapas Temáticos .....	6
La percepción remota desde plataformas satelitales.....	6
Sensores satelitales .....	8
Procesamiento digital de imágenes .....	10
Elementos de una imagen digital	
Procesamiento digital	
Sistemas de Información Geográfica.....	13
Definición de sistemas de información geográfica	
<b><i>II.- Aspectos Físicos y Geográficos del Golfo de California</i></b>	
Datos Geográficos .....	15
Localización y superficie	
Clima	



Aspectos Físicos .....17  
    Batimetría del Golfo de California  
    Mareas y Circulación

Aplicación de Percepción Remota en el Estudio de la Temperatura de la Superficie del Mar en el Golfo de California.....20

**III.- Obtención de la Temperatura de la Superficie del Mar por Medio de Imágenes de satélite.**

Los sensores AVHRR de los satélites NOAA .....22  
    Características de los satélites NOAA  
    Características de los sensores AVHRR  
    Aplicaciones principales de las imágenes AVHRR

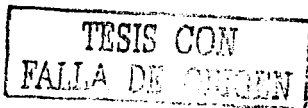
Algoritmo para la obtención de la Temperatura de la Superficie del Mar a Partir del Registro Radiométrico.....24

Procesamiento de imágenes AVHRR en el sistema TeraScan.....27  
    Introducción al sistema TeraScan  
    Captura de Datos  
    Calibración de datos Radiométricos  
    Obtención de la temperatura de la superficie del mar  
    Recortes de la imagen en un área específica (master)  
    Exportación de datos a otros sistemas

**IV.- Despliegue Cartografico de la Temperatura de la superficie del Mar del Golfo de California.**

Elementos Cartográficos.....33  
    Proyección Mercator  
    Simbología  
    Mallas o capas de información  
    Mascara de datos

Generación de isotermas.....35



Despliegue Cartográfico.....	36
Despliegue en papel	
Despliegue en forma digital	
<i>V.- Una Climatología de la Temperatura de la superficie del Mar del Golfo de California.</i>	
Análisis cartográfico de la distribución de temperaturas.....	38
Región del Alto Golfo	
Región Islas	
Región Central	
Región Boca	
Manifestaciones de El Niño 1997-1998 y la Niña 1998-2000 en la Distribución de la Temperatura de la superficie del Mar en GC.....	41
Análisis Numérico de la Distribución de Temperaturas.....	43
Análisis de la matriz de datos	
Anomalías de TSM	
Anomalías por zona	
Análisis de la TSM a lo largo de un transecto longitudinal del GC	
Funciones Empíricas Ortogonales	
 <i>VI.- Recuento de Resultados Principales y Conclusiones</i>	
Resultados principales.....	55
Variabilidad temporal	
Variabilidad espacial	
Conclusiones .....	56
Perspectivas.....	56

# PAGINACION DISCONTINUA

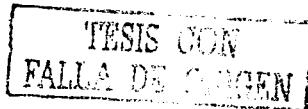


## INTRODUCCIÓN

El uso de la percepción remota con radiómetros montados en plataformas satelitales para el estudio de procesos oceanográficos que se manifiestan en la superficie del mar —particularmente aquellos que dejan una señal térmica en la superficie—, y el desarrollo de métodos cartográficos, estadísticos y matemáticos para procesar e interpretar las mediciones de la radiación emitida y/o reflejada por la superficie del mar —metodología que se conoce como *oceanografía satelital*—, es de gran utilidad debido principalmente a que se cubren grandes áreas del océano de forma instantánea y con una periodicidad de unas cuantas horas. Ello permite realizar análisis espacio-temporales de las distribuciones de la temperatura de la superficie del mar, de la topografía de la superficie del mar y/o de su color, entre otras variables, y crear una cartografía que describe con gran certidumbre, detalle y precisión estructuras y configuraciones de la superficie del mar. El examen de éstas permite identificar y ayuda a conocer y entender la dinámica de los procesos oceánicos asociados a las variables que son observadas y registradas a través de esta tecnología.

Este trabajo tiene como objetivo presentar, describir y analizar cartográfica y estadísticamente la evolución espacio-temporal de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM), en el Golfo de California (GC), para el periodo comprendido de enero de 1996 a diciembre de 2001. -Es decir, construir una Climatología de la TSM del GC con los datos correspondientes de ese periodo. Para ello se utilizan las imágenes obtenidas por sensores tipo AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) instalados en los satélites de la serie NOAA y procesadas con el sistema SeaSpace-Terascan. Tales imágenes forman parte del acervo de datos radiométricos del Laboratorio de Oceanografía Física (LOF) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, que desde 1996 alberga al proyecto de Oceanografía Satelital: *Oceanografía Satelital y Estudio de Procesos Oceánicos en Base a Imágenes de Satélite*.

El trabajo esta estructurado en cuatro partes: El primer capítulo introduce y explica los fundamentos básicos de Cartografía y de la Percepción Remota, herramientas en las que esta basada la obtención, manejo e interpretación de las imágenes procesadas. El capítulo dos se enfoca en los aspectos físicos y geográficos del Golfo de California, así como en los trabajos de percepción remota realizados en el estudio de la TSM. Los capítulos tres y cuatro explican los procesos realizados a las imágenes AVHRR para el cálculo de la TSM, utilizando el sistema SeaSpace-TeraScan. Se incluye en ellos el despliegue



cartográfico de algunas imágenes -en papel- y se explica el proceso de grabación de tales imágenes en forma digital -en animación-, incluyendo el CD correspondiente. Finalmente, los capítulos cinco y seis describen y muestran los resultados de la climatología de la TSM 1996-2001, la cual se calculó de tres formas diferentes. La primera por medio de una descripción cualitativa del despliegue cartográfico de la TSM, con la división del GC en cuatro regiones: Alto Golfo, Islas, Centro y Boca. Se desplegaron los mapas tanto en papel y como en una animación; ésta última de gran utilidad, ya que una inspección rápida permite observar con mayor claridad la evolución temporal de la TSM. La segunda forma de análisis se realizó analíticamente utilizando los píxeles de TSM de la matriz de datos que forman la imagen, para lo cual se eliminaron los valores de nubes y la parte continental (tierra). Se obtuvo para cada una de ellas el promedio espacial, su desviación estándar así como los valores mínimos y máximos. La última forma de análisis consistió en extraer de la matriz de datos un transecto longitudinal del GC. A estos transectos se les realizó algunas operaciones matemáticas para analizar e identificar rasgos notables de la variabilidad de la TSM en el GC.

El golfo de California es de gran interés en virtud de sus características singulares que tiene: es la única cuenca de evaporación del Océano Pacífico gracias a la fuerte influencia de las zonas áridas que lo rodean; es de una alta productividad biológica y sustenta una pesquería relativamente fuerte. La bibliografía científica presenta numerosas investigaciones que se han realizado para estudiar la evolución espacio-temporal de distribuciones de muy diversas de variables oceanográficas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, fosfatos, silicatos, biomasa, color de mar, rugosidad, topografía dinámica, velocidad, flujos de volumen, trayectorias de cuerpos de deriva, etc.) con el afán de conocer, explicar y entender la dinámica oceánica de esta importante cuenca oceánica nacional.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO I

### *Aspectos Generales de la Cartografía y Percepción Remota*

#### DEFINICIÓN DE LA CARTOGRAFÍA

El Hombre ha generado la curiosidad y desarrollado la necesidad de conocer las formas de la Tierra; de explicarse los accidentes geográficos que en ella existen y entender los cambios que ocurren en su relieve. Tal cuestionamiento condujo a la necesidad de la descripción sistemática del planeta y de su representación gráfica. Así nació la Cartografía.

Los hombres han elaborado y usado mapas desde la más remota antigüedad. La simbología de los mapas y las cartas de navegación es un lenguaje tan rico y flexible que a pesar de que su elaboración y uso existe desde hace siglos, los mapas siguen siendo el instrumento donde aparece toda la diversidad de las representaciones gráficas de la superficie de la tierra, que sin duda esta situación continuará dándose en el futuro.

Con recursos científicos y tecnológicos se han realizado diversos sistemas que se utilizan para el desarrollo de la Cartografía, lo que ha complementado y modificado su definición. Desde la más breve: *Cartografía es la ciencia, arte y técnica de la elaboración de mapas* (Campos,1999), hasta definiciones más completas, confeccionadas por diversos grupos reconocidos de cartógrafos. Por ejemplo la del grupo cartográfico de la Organización de las Naciones Unidas (ONU): *Cartografía es la ciencia y técnica encargada de la recolección, sistematización, tratamiento, representación y divulgación en mapas y cartas de información referente a fenómenos ubicados sobre o cerca de la superficie de la tierra o de otros cuerpos celestes.* (Campos,1999). Existen otras definiciones más específicas, como lo es la de la Cartografía Temática, que *representa solo una o varias variables relacionadas del medio geográfico*, y la de la Cartografía Digital, que es la *cartografía asistida con equipo de computo, que contiene información numérica que puede manipularse con gran flexibilidad y permite la producción de mapas formales de manera automatizada*

Reuniendo las diversas definiciones se puede resumir que el propósito central de la Cartografía consiste en reunir y analizar datos y medidas de diversas regiones de la Tierra y representarlas gráficamente de tal modo que todos lo



elementos y detalles sean claramente visibles y fáciles de transmitir, captar y entender.

Las ciencias naturales y las ciencias sociales proporcionan los datos crudos necesarios para la realización de cartografías temáticas. Sin embargo, la Cartografía como tal es independiente de cualquier ciencia que le proporcione su materia prima y constituye, por sí sola, una disciplina cuyo estudio sirve para representar y comunicar de modo claro y atractivo todo tipo de elementos e información susceptible de presentarse gráficamente de manera creativa.

## TIPOS DE REPRESENTACIONES CARTOGRAFICAS

### Mapas, Planos y Cartas.

Las diversas escuelas cartográficas tienen diferentes definiciones de lo que es una *carta*, un *plano* y un *mapa*. Por ejemplo, en la escuela anglosajona el término *mapa* es utilizado en forma general para las representaciones cartográficas, mientras que en la escuela francesa se usa el término *carta* para el mismo fin. Otras escuelas consideran un *mapa* como la representación gráfica y espacial de una selección de fenómenos diversos, ya sean físicos o geográficos, y a la *carta* como la representación de aspectos naturales y artificiales de la tierra destinada a fines prácticos de la actividad humana y que permiten determinar distancias, direcciones y localizaciones. A pesar de ser una simplificación se dice que los mapas se hacen para ser observados, mientras las cartas se han diseñado para trabajar con ellas. Ejemplo de esto son las cartas náuticas y las cartas aeronáuticas. Pero en realidad, lo que caracteriza a los mapas y cartas, cualquiera que sea su definición, es que están ligadas a una *proyección cartográfica* (López, 1999).

En contraste, un *plano* no requiere de una proyección cartográfica, por ser despreciable la curvatura de la tierra dado al tamaño de la región representada en él. Los *planos* en general son utilizados como resultado de levantamientos topográficos, y su simbología es más sencilla.

### Mapas basados en fotografías e imágenes de satélite

La producción de un mapa es normalmente un proceso laborioso y tardado. Sin embargo, nuevos métodos y tecnologías modernas han sido creadas y desarrolladas con el propósito de acelerar la producción de mapas y mejorar su precisión para muchos casos específicos. Los mapas hechos con diversas técnicas cartográficas aportan los instrumentos iniciales para analizar las diversas características de la superficie de la Tierra.

Dentro de estas nuevas técnicas están las del uso de fotografías aéreas y las de imágenes de satélite. En la medida en la que éstas han sido implementadas a la producción de mapas, y conjuntamente con el avance tecnológico en la



computación, se ha hecho evidente el enorme potencial y valor de la información de los mapas digitales, sobrepasando con mucho la perspectiva y el alcance de los mapas tradicionales.

Dentro de las representaciones cartográficas fotográficas y/o digitales que han sido aceptadas como tales, encontramos a los *ortofotomapas*. Los ortofotomapas son imágenes de fotografías aéreas y/o de satélite corregidas para ser utilizadas como mapas. Estas correcciones en su mayoría son geométricas, y están ligadas a un datum de referencia y a una proyección cartográfica.

## ELEMENTOS DE UN MAPA

La elaboración de mapas en general debe cumplir con ciertas características y contener ciertos elementos fundamentales tales como *proyección, escala y simbología*. Todo esto con el fin de representar en forma clara el propósito del mapa y que el usuario tenga una fácil interpretación de lo que en él se representa.

### Proyecciones Cartográficas

Las proyecciones cartográficas sirven para representar en una superficie plana (bidimensional) a toda la superficie de la tierra o bien a una porción de ella. Pero el proceso de proyección cartográfica de un mapa introduce distorsiones geométricas de forma, distancia y dirección que afectan la percepción de las escalas y el cálculo de áreas. Algunas proyecciones minimizan un determinado tipo de distorsiones pero exacerban la magnitud de otras.

En cuanto al grado de deformación de las superficies representadas, las proyecciones se clasifican en:

- *Conformes*, que son las que mantienen los ángulos observados en la superficie representada, como por ejemplo la proyección *Mercator*;
- *Equivalentes o isométricas*, que son las que conservan la relación en la superficie (no hay deformación en áreas), como por ejemplo la proyección *Cónica de Albers* y la *Azimutal de Lambert*;
- *Equidistantes*, que son las que conservan la proporción entre la distancia, en determinadas direcciones en la superficie representada; por ejemplo, la *Cilíndrica Equidistante*.

### Proyecciones Cilíndricas

Las proyecciones cilíndricas son el resultado de la proyección de una esfera (considerando a la Tierra como tal) sobre un cilindro, que puede ser entonces desenrollado en forma plana. El eje longitudinal del cilindro puede coincidir o no con el eje polar de la Tierra. Cuando el cilindro forma ángulos rectos con el eje polar de la esfera terrestre, el cilindro y la proyección resultante



de denominan *transversas*. La superficie cilíndrica puede ser tangente a la esfera, es decir, cuando toca a la esfera en un solo círculo. Por ejemplo, en el círculo del ecuador terrestre de la esfera. Cuando el cilindro es secante, toca a la esfera en dos círculos. La característica principal de esta proyección es que todos los meridianos y paralelos son líneas rectas y forman ángulos rectos y cualquier ángulo medido en el mapa concuerda en el terreno. Entre las proyecciones cilíndricas más conocidas están las de Mercator.

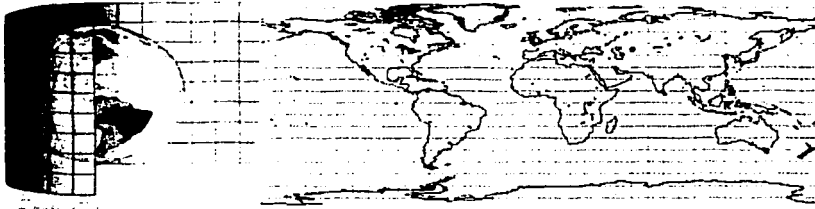


Figura 1.1 Proyección Cilíndrica  
Tomado de <http://www.frigoletto.com.br/Cartografa/projees.htm>

### Proyecciones cónicas

Las proyecciones cónicas están basadas en la proyección de la esfera sobre una superficie cónica que puede desenrollarse. Las características principales de las proyecciones cónicas es que los meridianos convergen en un punto (en el vértice del cono) y todos los paralelos son círculos concéntricos a este punto. En esta proyección al igual que la cilíndrica, el cono puede ser tangente o secante a la esfera.

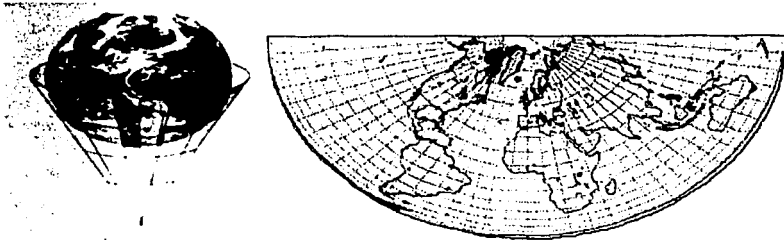


Figura 1.2 Proyección Cónica  
Tomado de <http://www.frigoletto.com.br/Cartografa/projees.htm>

### Proyecciones azimutales

Las proyecciones azimutales están basadas en la proyección de la tierra sobre un plano. Estas proyecciones pueden ser polares, ecuatoriales u oblicuas. Al contrario de las proyecciones cónicas, las azimutales son utilizadas para la representación cartográfica de áreas muy grandes.

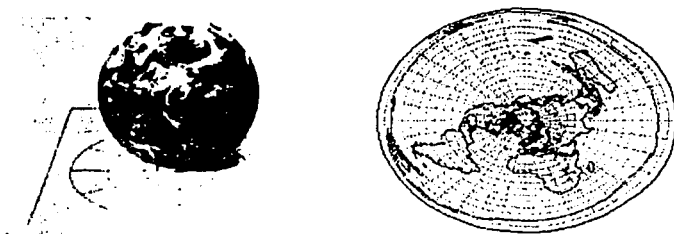


Figura 1.3 Proyección Azimutal.  
Tomado de <http://www.frigoletto.com.br/Cartogra/projees.htm>

### Concepto de Escala

Hemos definido un mapa, en general, como una representación convencional de la configuración de la superficie de la Tierra o una porción de ella. Toda representación, como toda imagen, guarda una relación específica de tamaño o proporción determinada de la extensión geográfica-espacial con el objeto representado. La expresión numérica y analógica (gráfica) de esta relación de proporción se denomina *escala*.

La escala se representa generalmente por uno de los modos siguientes (Raisz, 1985):

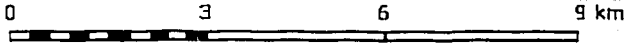
- *Escala numérica*, es la representación que da la relación entre la longitud de una línea en el mapa y la correspondiente en el terreno en forma de quebrado con la unidad por numerador. Así,

$$\text{escala : } \frac{1}{250\,000} \quad \text{ó} \quad 1:250\,000$$

Esto significa que cada unidad de distancia en el mapa representa 250 000 de esas mismas unidades en la entidad física cartográficamente representada.

TESIS  
FALLA DE ORIGEN

- *Escala gráfica*, que representa las distancias en el terreno sobre una línea recta graduada; ésta escala permite medir distancias sobre la carta y visualizar de modo fácil las dimensiones de los objetos en la carta.



## Simbología

Todos los mapas utilizan signos y símbolos para denotar a los muy diversos elementos de la realidad que aparecen en ellos. Algunos mapas utilizan esquemas de simbolización singulares y específicos. Otros utilizan símbolos convencionales que facilitan la interpretación del lenguaje de los mapas por parte de los diferentes usuarios.

Los medios visuales de variación de los elementos gráficos o signos usados en el mapa son muy importantes. Sirven para mostrar las diferencias y las relaciones existentes entre las diferentes clases de datos. En general, para mapas topográficos la simbología se establece según la escala. Pero en mapas temáticos predomina la circunstancia de dar absoluta libertad para elegir la simbología. Sin embargo se deben respetar criterios básicos como el que señala que el símbolo debe de hablar por sí mismo (íconos), es decir, debe dar clara idea del atributo que representa. También el símbolo debe ser pequeño, para así poder incluir en el mapa la mayor cantidad de información posible. Además los signos deben ser claros, sencillos y fáciles de dibujar. Por último, pero no por ello menos importante, deben ser estéticos, es decir, atractivos y gratos a la vista. (López, 1999)

Los elementos empleados por lo general son: *puntos, líneas, figuras, colores y la combinación estética de estos elementos*. Como símbolo, el punto es el elemento mínimo. Se pueden elaborar mapas donde cada punto indique un cierto valor. El color es otro elemento muy rico en contenido simbólico, pero no siempre hay libertad para utilizarlos; las diferentes tonalidades y matices de los diversos colores proporcionan una gama enorme de signos, sobre todo en los mapas temáticos.

## Interpolación

Cuando se obtienen datos para la elaboración de mapas, datos como: altitud, presión, precipitación, temperatura, densidad de población, codificación geológica, magnetismo, gravimetría, conductividad eléctrica del suelo o cualquier otro fenómeno, es imposible medir los valores del fenómeno de manera continua en toda la superficie terrestre. Por ello es que se suele tomar valores en puntos



específicos bien posicionados (georeferenciados), agregando al valor de la variable en cuestión la posición geográfica exacta del lugar en donde se tomó, es decir: valor más latitud y longitud. Posteriormente esto permitirá realizar una interpolación de tales datos. La interpolación genera valores aproximados entre estos puntos, es decir, en la zona donde no tenemos ninguna medida. La visualización de estos valores en los mapas son representados por *isolíneas*. Éstas son líneas que unen datos (valores de una misma variable o parámetro) con el mismo valor numérico. Por ejemplo, las 'curvas de nivel' de un mapa topográfico son *isolíneas* (de la altura con respecto a un nivel de referencia).

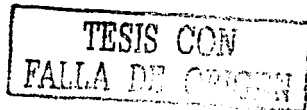
Antes, el proceso de la interpolación de los datos para generar las *isolíneas* era muy tardado y por lo general se utilizaban métodos visuales subjetivos, o en el mejor de los casos métodos geométricos para la interpolación y trazado de las *isolíneas*. Hoy en día existen programas expertos para la generación y trazo de *isolíneas*, a través de diferentes métodos objetivos de interpolación, como los estadísticos y los basados en funciones matemáticas.

## GENERACIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS

Los mapas temáticos son distintos de los mapas generales. Mientras que los mapas generales tratan de representar las relaciones posicionales de una variedad de atributos distintos en un solo plano, los mapas temáticos se centran en las variaciones espaciales y en la forma de un solo atributo o en la relación existente entre varios atributos específicos (Robinson, 1987).

El objetivo de los mapas temáticos es la representación de la forma y estructura de la distribución de una variable central – el tema objetivo del mapa –. No hay límite en cuanto el contenido de los mapas temáticos, los cuales abarcan desde la imagen satelital de la cubierta de nubes de una porción de la Tierra, hasta el mapa de la trama de los resultados de unas elecciones políticas federales o estatales. Ejemplos de esta cartografía, serían los mapas de la temperatura de la superficie de los mares regionales de México, de la precipitación en la República Mexicana, de la densidad de la población nacional o de la presión atmosférica mensual en una región determinada.

Que un mapa se ocupe fundamentalmente de una sola clase de fenómenos, no necesariamente quiere decir que sea un mapa temático. Por ejemplo, los mapas de suelos pueden ser adecuadamente clasificados como generales si su objetivo primordial es mostrar las situaciones de los diversos tipos de suelo en una zona determinada. Pero si con los mismos datos se pueden utilizar medios de representación que centren su atención únicamente en la estructura de la distribución, entonces pueden ser denominados mapas temáticos



## LA PERCEPCIÓN REMOTA DESDE PLATAFORMAS SATELITALES

La percepción remota es la rama científico-técnica dedicada a desarrollar métodos para obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto directo con el objeto, área o fenómeno bajo investigación. Por ejemplo, al leer estas palabras se está empleando el principio de percepción remota; los ojos están actuando como sensores que responden a la luz reflejada de esta página o pantalla. Los "datos" que los ojos identifican y toman son impulsos electromagnéticos que corresponden a la cantidad de luz reflejada de las áreas oscuras y claras en la página o pantalla. Estos datos se analizan y se interpretan en el cerebro del lector (en su computadora mental) y le permitirle explicar que las áreas oscuras en la página corresponden a una colección de letras que forman palabras. Mas allá de esto se reconoce que las palabras forman frases y éstas se interpretan e integran (decodifican) para asimilar la información que las frases llevan (leer).

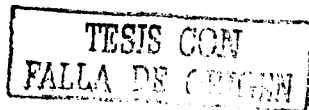
Los procesos elementales básicos involucrados en la percepción remota desde plataformas satelitales son:

- (1) *la adquisición de datos y*
- (2) *el análisis de datos.*

La fase de adquisición de datos por medio de instrumentos sensibles a la radiación electromagnética – radiómetros -, montados en satélites artificiales que circundan a la Tierra (sensores satelitales), se concentra en el registro de la energía radiante que llega al sensor desde la fuente de radiación. Es decir, la cuantificación de la cantidad de radiación electromagnética emitida y reflejada de la superficie de la Tierra que es captada por los radiómetros satelitales.

El proceso de análisis de datos involucra, por su parte, el manejo, la validación, el archivo y el despliegue de los datos. Esta última etapa consiste en la presentación de los datos en pantalla y también en forma numérica digital.

Con los datos de referencia y la información que se obtiene de los elementos estudiados, con los productos de información típicos como mapas, estadísticas y reportes escritos de los datos y con la ayuda de datos complementarios de referencia, el analista extrae información sobre el tipo, magnitud, situación y condición de los elementos geográficos que tengan bajo estudio. Con esta información y con los datos de los sensores satelitales, se presentan resultados generalmente en forma de mapas, estadísticas e informes escritos y con ellos finalmente argumentar, sustentar y tomar acciones y decisiones.



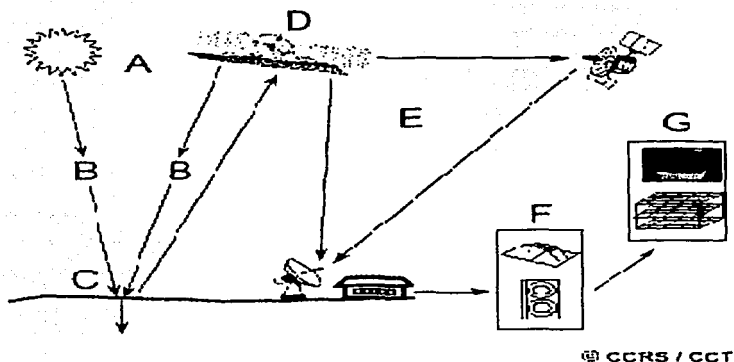


Figura 1.4 Elementos básicos en Percepción Remota.- (A) Fuente de energía, (B) Radiación y su paso en la atmósfera, (C) Objetivo o Escena, (D) Sensor, (E) Transmisión y recepción de datos, (F) interpretación y análisis, (G) Aplicación. Tomado del centro de percepción remota de Canada. [www.ccrs.nrcan.gc.ca](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca)

## SENSORES SATELITALES

Un sensor es un dispositivo capaz de percibir, captar y registrar de manera selectiva la energía proveniente de un objeto o de un proceso o fenómeno físico. El sensor, incorporado a un instrumento mecatrónico que convierte la señal registrada a una forma tal que se pueda transformar en valores numéricos y procesarlos para extraer la información en ellos. Los datos que mediante los sensores se obtienen pueden ser de varios tipos, como distribuciones de ondas acústicas o distribuciones de energía electromagnética e incluso, variaciones en distribuciones de fuerza. Por ejemplo, los sensores remotos como los sistemas fotográficos y ópticos electrónicos, son capaces de detectar y registrar la radiación electromagnética emitida o reflejada por una amplia variedad de objetos, procesos y fenómenos físicos.

Podemos clasificar cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda y su frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La clasificación en bandas de longitudes de onda y frecuencia se denomina espectro electromagnético.

TESIS CON  
FALLA DE COPIADO

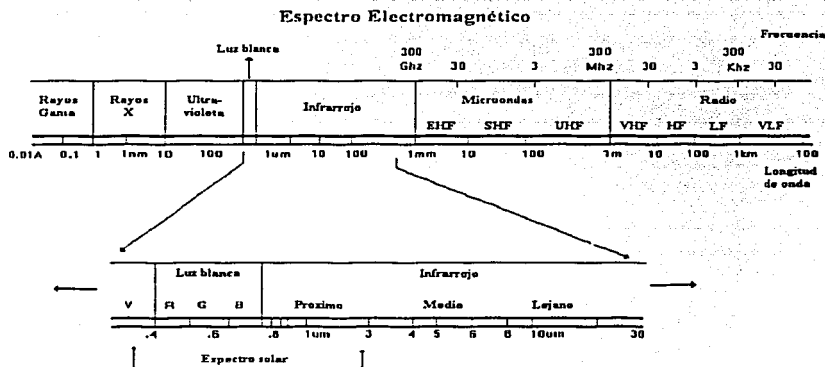


Figura 1.5 Espectro Electromagnético (Tomado de SPRING,2001)

Todos los materiales y fenómenos naturales absorben, transmiten, reflejan y emiten radiación electromagnética de manera selectiva. Esta radiación es susceptible de medirse con gran precisión y a distancia, por diversos sistemas sensores radiométricos.

Debido a la posibilidad que tienen los radiómetros de captar e identificar las señales espectrales de los diferentes objetos o fenómenos, se han podido establecer diferentes programas espaciales para fines específicos como son el estudio de la atmósfera y el océano a escalas global y regional y la topografía, entre otros ámbitos de nuestro planeta. Entre los programas en desarrollo más conocidos están: Landsat, NOAA, GOES, ERS, SPOT. Dependiendo del trabajo a realizar, se selecciona el sensor que permite observar, detectar y medir las variables fundamentales del ambiente que se quiera estudiar.

### Componentes del Sistema Sensor

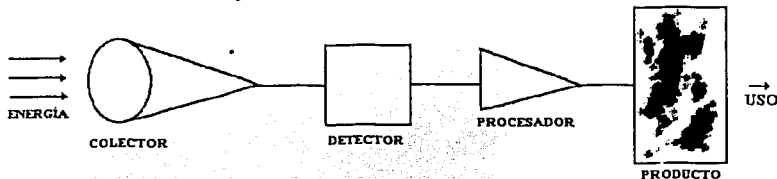


Figura 1.6 Todo sistema de sensores remotos (para captar la radiación electromagnética) consiste de los componentes mostrados. (Tomado de SPRING, 2001)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La *resolución* es una medida de habilidad que posee un sistema sensor para distinguir entre dos estímulos o valores distintos, aunque éstos puedan ser espectralmente semejantes o espacialmente cercanos. La resolución puede ser clasificada como: *espacial*, *espectral*, *temporal* o *radiométrica*. La resolución depende generalmente de muchos factores. Por ejemplo, la resolución espacial de un cierto tipo de radiómetro satelital depende de la altura orbital, de la velocidad de exploración y del número de detectores radiométricos del sensor.

La *resolución espacial* se refiere al valor más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. La resolución *espectral* nos indica el número y ancho de bandas espectrales que puede discriminar el sensor. La *resolución radiométrica* es la capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe y que esta asociada a la sensibilidad del sistema sensor. Por último, la *resolución temporal* se refiere a la frecuencia de adquisición de imágenes y al tiempo en que tarda en realizar un barrido de la escena.

La tabla que a continuación se presenta ejemplifica las características de la resolución de los sistemas sensores Enhanced Thematic Mapper (ETM), Haute Resolution Visible (HRV) y Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), a bordo de los satélites Landsat, SPOT y NOAA, respectivamente.

Resolución /sensor	ETM Landsat	HVR SPOT	AVHRR NOAA
Espacial	30 m 60 m (banda 6) 15m (banda 8)	20 m (banda 1 a 3) 10 m (pan)	1.1 km
Esppectral (Bandas espectrales) (micrómetros)	Banda 1: 0.45-0.52 Banda 2: 0.52-0.6 Banda 3: 0.63-0.6 Banda 4: 0.76-0.90 Banda 5: 1.55-1.75 Banda 6: 10.74-12.5 Banda 7: 2.08-2.35 Banda 8: 0.50-0.90	Banda 1: 0.50-0.5 Banda 2: 0.61-0.68 Banda 3: 0.79-0.8 Pan: 0.51-0.73	Banda 1: 0.58-0.68 Banda 2: 0.725-1.1 Banda 3: 3.55- 3.93 Banda4: 10.30-11.30 Banda 5: 11.50-12.50
Radiométrica	8 bits	8 bits (1-3) 6 bits (pan)	10 bits
Temporal	16 días	26 días	12 horas

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Por procesamiento digital de imágenes se entiende la manipulación de una imagen a través de la computadora con la finalidad de mostrar y mejorar el aspecto visual de los elementos estructurales de una escena determinada. Sirve para el análisis apropiado de ella y para proveer de otras herramientas complementarias, como gráficas, matrices de datos, etc..., que conduzcan al conocimiento integral y profundo de dicha escena, conformada por el material analizado. Las técnicas de procesamiento digital de imágenes, además de permitir analizar los elementos estructurales de una escena en diferentes regiones del espectro electromagnético, también posibilitan la integración de varios tipos de datos.

### Elementos de una Imagen Digital

Una imagen digital se puede representar por una matriz de datos, en donde las líneas y columnas definen las coordenadas espaciales (latitud, longitud) de cada área mínima captada por el sensor. Cada una de éstas áreas de registro se denominada "píxel" (*picture element*). El píxel representa el valor de la energía que en una determinada banda de longitud de onda del espectro electromagnético capta el sensor, del objeto o del proceso emisor de la energía. El píxel es el elemento lógico de la imagen digital.

Cuando el sensor termina de medir la radiación electromagnética de los objetos o fenómenos que integran una escena determinada, se tiene una colección de matrices de números, una para cada banda o intervalo de energía que haya captado el sensor.

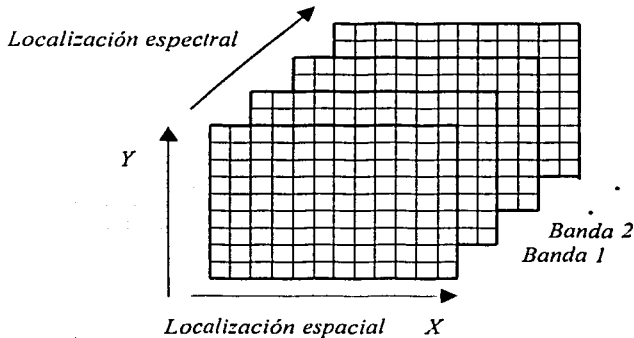


Figura 1.7 Organización de una imagen digital

Existen básicamente dos formas de obtener una imagen digital: digitalizando una imagen existente en papel o bien adquiriendo una imagen desde la captura del sensor en formato digital.

Una imagen digital puede ser definida por una función bidimensional de la forma  $I(x,y)$  donde los valores 'I' representan la intensidad de la radiación emitida y reflejada (radiancia) del objeto (escena) para cada píxel, en cada coordenada espacial (x,y). Esa intensidad es representada por un valor entero, no negativo y finito, que se denomina *nivel de gris*.

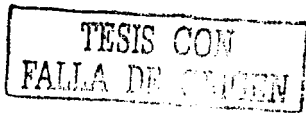
La *radiancia* es el flujo de radiación que proviene de la fuente en una determinada dirección por unidad de área. En realidad, la medida de la radiancia representada en cada píxel por su nivel de gris no es solamente la radiación reflejada por la superficie contenida en valor del píxel, sino también la radiación debido a la dispersión atmosférica.

## Procesamiento digital

El procesamiento de una imagen digital varía dependiendo de los tipos de imagen y los objetivos perseguidos, pero en general se realizan los siguientes procesos:

- a) Correcciones radiométricas
  - Restauración de píxeles
  - Corrección de bandeo
  - Corrección atmosférica
- b) Correcciones geométricas
  - Referencia geográfica
  - Navegación
- c) Realces y mejoramiento visual de la imagen
  - Ajuste de contraste
  - Composiciones en falso color
  - Filtros
  - Transformaciones de tono, saturación e intensidad.
- d) Transformaciones de la imagen
  - Operaciones entre bandas e índices
  - Análisis de componentes principales
- e) Clasificación
  - No supervisada
  - Supervisada
  - Métodos mixtos
- f) Obtención y presentación de los resultados
  - Productos cartográficos
  - Productos estadísticos

(Tomado de Bello, 1998)



El objetivo de utilizar las técnicas de realce en las imágenes digitales es mejorar el aspecto visual de ciertos elementos estructurales y proveer otros datos para la mejor interpretación de la escena. Por fines prácticos en este trabajo solo se describen. Ajuste de contraste, filtraje y análisis de componentes principales.

### Ajuste de Contraste

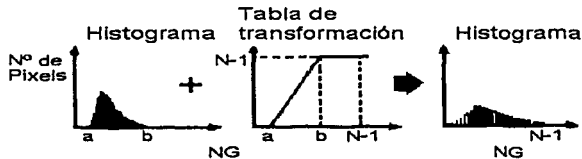
La técnica de realce de contraste tiene como objetivo mejorar la calidad de las imágenes bajo los criterios subjetivos del ojo humano. El contraste entre dos objetos puede ser definido como la razón entre sus niveles de gris.

La manipulación de contraste consiste en la transferencia radiométrica de cada píxel con el propósito de aumentar la discriminación visual entre los objetos presentes en la imagen. La operación es realizada punto por punto. Esta transferencia radiométrica se realiza con ayuda de histogramas, que son manipulados para obtener el realce deseado.

Un histograma describe la distribución estadística de los niveles de gris en términos del número de muestras (píxeles) en cada nivel de gris. La distribución puede también ser dada en términos del porcentaje del número total de píxeles en cada nivel de gris en la imagen.

Para aumentar el contraste de una imagen se debe modificar el intervalo de niveles de gris de la imagen original. Para ello se utiliza una función que asocia las variaciones dentro del intervalo original de tonos de gris con las correspondientes en el otro intervalo deseado. Esta relación es una operación puntual que utiliza una función matemática, denominada transformación radiométrica, la cual considera solamente el nivel de gris original de cada píxel para calcular el nuevo valor en la imagen de salida.

### Ejemplificación de la técnica de realce de contraste



donde NG = Nivel de Gris



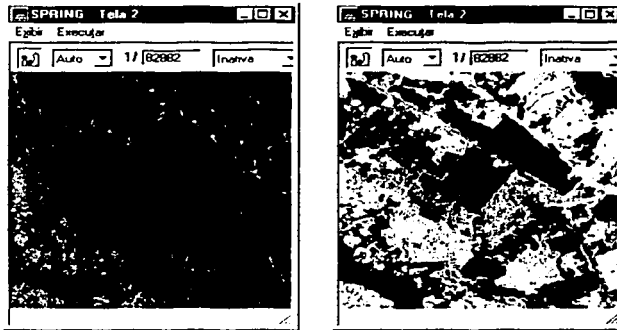


Figura 1.8 Imágenes de la banda 5 del satélite Landsat. La imagen de la izquierda corresponde a la banda original y la de la derecha es la banda realizada por una modificación lineal del histograma (Tomado de SPRING,2001)

### Filtraje

Los filtros sirven para suavizar o realzar detalles estructurales de la imagen, o bien para minimizar defectos de la imagen de diverso origen. Las técnicas de filtraje son transformaciones de la imagen píxel por píxel, que no dependen solamente del nivel de gris de un determinado píxel, sino también del valor de los niveles de gris de los píxeles vecinos en la imagen original.

El proceso de filtraje es realizado utilizando matrices denominadas "máscaras", las cuales son aplicadas sobre la imagen. Lo que resulta después de la aplicación de un filtro es una nueva imagen. Los más utilizados en el procesamiento de imágenes son los filtros "pasa-bajas" y los "pasa-altas". Ambos se refieren a eliminar de la imagen original, señales de alta y baja frecuencia, respectivamente.

### Análisis de Componentes principales

Frecuentemente se observa que las bandas individuales de una imagen multiespectral están altamente correlacionadas, es decir, las bandas son muy similares visual y numéricamente. Esta correlación puede venir del efecto de las sombras resultantes de la topografía, de la superposición de las ventanas espectrales entre bandas adyacentes y/o del propio comportamiento espectral de los objetos. El análisis de las bandas espectrales individuales puede ser ineficiente debido a la información redundante presente en cada una de esas bandas.

La transformación por componentes principales es una técnica de realce que reduce o remueve esta redundancia espectral y genera un nuevo conjunto de

imágenes cuyas bandas individuales presentan informaciones no disponibles en otras bandas (SPRING,2001).

Esta transformación se deriva de la matriz de covarianza entre las bandas y crea un nuevo conjunto de imágenes donde cada valor de píxel es una combinación lineal de los valores originales. El número de componentes principales es igual al número de bandas espectrales utilizadas y son ordenadas de acuerdo con el decrecimiento de la varianza del nivel de gris. La primera componente principal tiene la mayor varianza (mayor contraste) y la última, la menor varianza.

## SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El procesamiento de las imágenes digitales es un proceso automatizado pero requiere de un conocimiento previo del área de estudio, anteriormente los mapas y diversas técnicas cartográficas aportaron los instrumentos iniciales para analizar y para localizar las muy diversas formas, procesos y características de la superficie de la Tierra. Aunque a menudo se acopió información estadística y ésta se utilizó para ilustrar la heterogeneidad espacial de la superficie de la Tierra, los análisis habían sido hasta la fecha muy escasos. Se procedía simplemente a representar las características en mapas utilizando diversas técnicas visualmente eficaces que se esperaba mostraran aspectos importantes de la distribución regional de variables de interés particular.

La aparición de la computadora modificó radicalmente los alcances de la Geografía como disciplina científica. Ella permitió y auspició la acumulación y el procesamiento de grandes volúmenes de datos que con el tiempo se pudieron integrar como consecuencia de muchos y muy diversos análisis, la mayoría con énfasis en las características de su localización.

Todo esto anunció un cambio sustantivo de la información. Dando lugar a nuevas disciplinas como la Geomática (la palabra proviene de la unión de geografía e informática), que reúne todo el espectro de disciplinas científicas relacionadas con la representación espacial de los fenómenos geofísicos (Geodesia, Topografía, Percepción Remota, etc). Existen otras disciplinas como la Geoinformática que establece los principios, técnicas y tecnología de la recepción, almacenamiento, transmisión y procesamiento de los datos, así como la elaboración, sobre la base de estos datos, de nueva información y conocimientos sobre los fenómenos espacio-temporales (Tikunov, 1989;1991). Los sistemas de información geográfica son los instrumentos utilizados para el procesamiento, análisis y almacenamiento de los datos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Definición de los Sistemas de información Geográfica

Al igual que en la Cartografía existen diversas definiciones de un Sistema de Información Geográfica (SIG):

- Un SIG es un modelo de la realidad que permite la adquisición almacenamiento, procesamiento, manipulación, consulta, presentación y diseminación de información geográfica.
- Un SIG es un conjunto de información, tecnología (instrumentos, codificación, telecomunicaciones), metodologías, y personas que, dentro de una organización, coadyuvan al manejo sistemático de información geográfica.
- Un SIG es una herramienta informática y analítica que apoya las tareas de análisis espacial.
- Un SIG es un sistema de información donde los elementos tienen una referencia espacial.

(Definiciones, tomado de Reyes, 1999)

Dada la diversidad de definiciones de GIS, se debe tener claro que el objetivo de un GIS esta orientado a la solución de problemas espacio-temporales ya sea de carácter antropogénico o natural, ayudados de sistemas expertos o programas como ILWIS, ARC INFO, AUTOCARTO e IDRISI, entre otros.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO II

### *Nociones de la Geografía Física del Golfo de California*

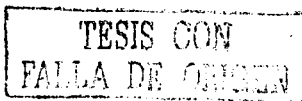
#### **DATOS GEOGRÁFICOS**

El Golfo de California, también llamado Golfo de Cortés, Mar Bermejo o Mar de Cortés, representa el 20 % de los 10,000 kilómetros nominales de las costas de México (Lavin y cols.1997). El Golfo de California (GC, en adelante) es un mar marginal de considerable interés oceanográfico y meteorológico, entre otras razones por su alta productividad biológica y por sus muy particulares características hidrográficas, climatológicas y topográficas. Por ejemplo, es la única "cuenca de evaporación" del océano Pacífico (Rodén, 1958), lo que significa una importante fuente de humedad para la región circundante a ella.

Son muchos los estudios que se han realizado en el GC, principalmente debido a que es un mar cuyas dimensiones geográficas y accesibilidad facilitan el estudio de muy diversos procesos físicos oceanográficos; por ejemplo: mezcla vertical por efecto del arrastre de los vientos, mezcla horizontal y vertical por efecto de las mareas, intercambio de calor, masa y momento en la interfase océano-atmósfera y balances de evaporación - precipitación. Todos ellos determinan las características termohalinas (temperatura y salinidad) del agua de mar, su densidad y consecuentemente controlan la circulación y definen la rica estructura dinámica del GC.

#### **Localización y Superficie**

El Golfo de California (GC) esta geográficamente limitado por la costa oriental de la península de Baja California y la costa occidental del norte de México correspondiente a los Estados de Sinaloa y Sonora. Se extiende en una dirección de nor-noroeste a sur-sureste y tiene una longitud aproximada a 1100 km, con anchuras variables de 92 km cerca del extremo norte, a 220 km en la boca que comunica al Océano Pacífico. El GC se localiza entre las latitudes de 23° N y 31° 45' N y entre las longitudes de 107° W y 115° W. Tiene una superficie aproximada de 163 000 km<sup>2</sup>. (Ver figura 2.1).



Dentro del GC se encuentran más de 100 islas y otros tantos islotes. Entre ellas están las más grandes de México: Isla Tiburón y Ángel de la Guarda, además de otras de menor extensión como son las islas Cerralvo, Espíritu Santo, San José, San Diego, Santa Cruz, Santa Catalina, Monserrat, Del Carmen, San Marcos, San Lorenzo y San Esteban.

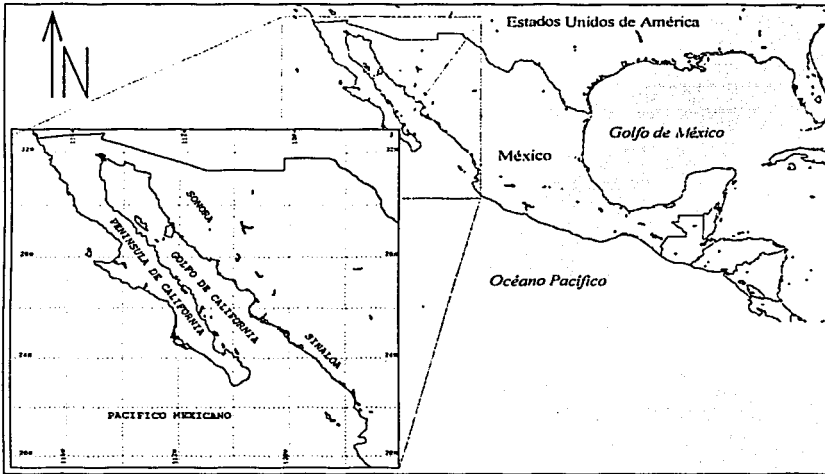


Figura 2.1 Ubicación geográfica del Golfo de California

### Clima.

Por su forma alargada y estrecha, el GC se aísla casi del Océano Pacífico y está fuertemente influenciado en su climatología por las zonas áridas y montañosas que lo cercan. Este aislamiento se produce por la cadena montañosa que se extiende a lo largo de la península de Baja California, con altitudes de hasta 3000m de altura sobre el nivel del mar. Por ello, los vientos que soplan sobre la superficie del GC y el intercambio de calor y humedad que sobre ésta se dan son muy distintos de los que se manifiestan en el Océano Pacífico nororiental, adyacente a la península occidental de Baja California.

La evaporación es uno de los factores dominantes del clima del GC. Ella es la responsable de la alta salinidad relativa que se observa en el estrato

superficial del mar. En contraste, la precipitación y la descarga de los ríos, por escasas, parecen tener efectos pequeños sobre la dinámica y la termodinámica total del golfo. Sin embargo, en algunos lugares de la costa, éstas pueden tener una influencia considerable en la temporada de ciclones. Aunque el Golfo de California es la única cuenca de evaporación del Océano Pacífico, en realidad no esta estrictamente rodeado de desiertos. En Baja California y Sonora la vegetación es del tipo de estepa seca, mientras que en Sinaloa y en la punta de la península la vegetación es tropical (Roden, 1958). Por ello que se puede decir que sólo la mitad norte del GC esta rodeada de zonas áridas y semidesérticas.

En el GC los vientos tienen un marcado ciclo estacional, y además las cadenas montañosas en ambas costas canalizan el viento a lo largo del eje longitudinal del golfo: El viento sopla del noroeste durante todo el invierno con una rapidez promedio de  $8$  a  $12 \text{ m s}^{-1}$  y del sureste durante buena parte del verano, con una rapidez promedio  $5 \text{ m s}^{-1}$  (Lavin y cols.1997). Así, el sistema de vientos dominantes mueve sobre la superficie del GC durante el verano, aire con características de humedad y temperatura muy diferentes a las del que se mueve en invierno debido al origen distinto de las masas de aire correspondientes. En verano, el aire proviene de la zona marítima tropical, y consecuentemente es húmedo y tibio. En el invierno, el aire proviene de la masa continental de Norteamérica, así que es frío y seco.

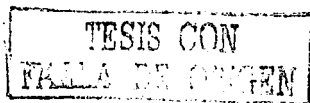
## ASPECTOS FÍSICOS

### Batimetría del Golfo de California

Debemos entender como batimetría la determinación y representación grafica del relieve del fondo de los cuerpos de agua (mares, lagunas, lagos, ríos, etc.). Así, la batimetría del GC presenta características singulares que influyen en la circulación general de las masas de aguas que lo conforman.

La configuración del fondo marino del GC consiste de casi una docena de cuencas profundas, de hasta  $3000\text{m}$  de profundidad, separadas por umbrales de distintas profundidades. Las cuencas son: Pescadero, Farallón, Carmen, Guaymas, San Pedro Mártir, San Esteban, Tiburón, Salsipuedes, Delfin y Wagner.

El GC tiene también un pequeño archipiélago que reúne las islas más grandes de México (Tiburón y Ángel de la Guarda). Se caracteriza además por umbrales someros y canales angostos que comunican la región al norte de las islas con la parte sur del golfo. Por ejemplo, los canales de Ballenas y Salsipuedes, entre la península de Baja California y la cadena de islas que inicia en Isla San Lorenzo y termina en Isla Ángel de la Guarda, tienen profundidades máximas de  $1600\text{m}$ , con umbrales tanto en



el lado sur como en el norte. Esto hace que las condiciones oceanográficas, particularmente los flujos horizontales y la mezcla vertical de las masas de agua en esta área tengan un control topográfico severo.

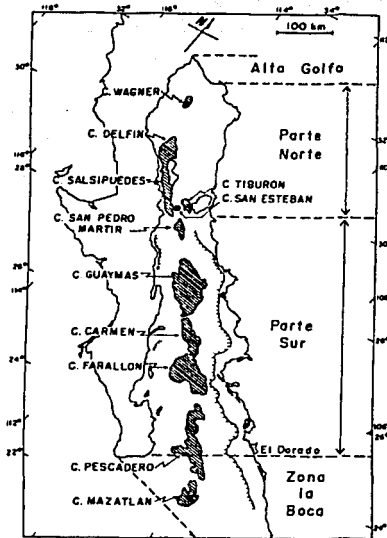


Figura 2.2 Regiones, cuencas y plataforma continental del Golfo de California. Las zonas sombreadas indican la isobata del umbral más profundo. La plataforma Continental se marca con la isóbata de 200m. Tomado de Lavin y cols., 1997

El intercambio de agua entre las zonas al norte y al sur de las islas ocurre a través de estos umbrales, y la comunicación más amplia (tanto por su profundidad como por su anchura) ocurre entre las islas San Lorenzo e isla San Esteban. El segundo lugar en importancia para este intercambio es sobre el umbral de San Lorenzo, pero es 200 m menos profundo y más angosto. Existe también intercambio de agua a través del canal entre Isla San Esteban e Isla Tiburón, pero este canal es somero, de aproximadamente 200m de profundidad. Además, el Canal Infernillo, entre isla Tiburón y la costa de Sonora tiene sólo unos 5 m de profundidad, razón por la que no es significativo en el intercambio de masas de agua.

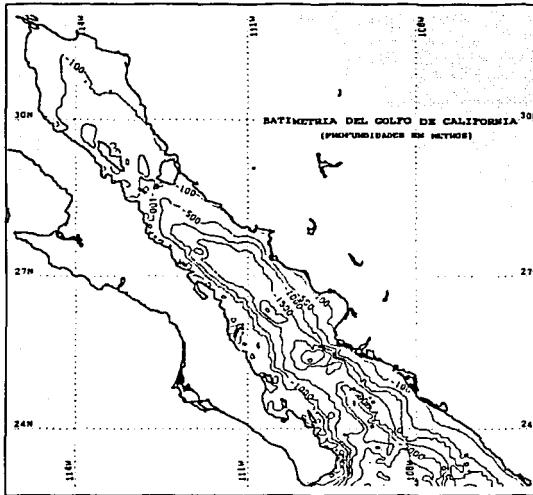


Figura 2.3 Batimetría del Golfo de California, generada a partir de los datos ETOPOS-5

La parte norte del Golfo es mucho más somera que la parte sur y aunque contiene algunas cuencas, su profundidad media es de 200m, razón por la que puede clasificarse como plataforma continental. Para reafirmarlo, el extremo norte del GC, denominado 'Alto Golfo', y que comprende un triángulo de aproximadamente 70 Km por lado con vértices en la desembocadura del Río Colorado, en San Felipe y en Puerto Peñasco, con una profundidad media de 15 m, esta sujeta a fuertes corrientes de marea.

Otra cuestión importante es la distribución espacial y temporal de las diversas propiedades termodinámicas del agua en el GC. Entre ellas, las de mayor interés son la temperatura, la salinidad y la concentración de fosfatos, silicatos y oxígeno disuelto. Los factores que influyen en la distribución de estas propiedades son múltiples y con una dinámica compleja. Ellos son el viento, la batimetría, las mareas y las corrientes. El propósito de este trabajo es la descripción, aplicación y discusión de una metodología para estudiar la distribución espacio-temporal de la temperatura de la superficie del mar del GC.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## Mareas y Circulación

La marea es el nombre que se da al cambio continuo y regular del nivel del mar y de las corrientes marinas con periodos diurnos o semidiurnos. Aunque también tiene variaciones en periodos mayores (mensuales, anuales y de varios años). Esta variación periódica del nivel del mar es debida a la atracción gravitacional diferencial y al movimiento astronómico relativo entre la Tierra y la Luna y la Tierra y el Sol. La variación del nivel del mar se propaga como una onda a través de las cuencas oceánicas y a lo largo de las costas.

La marea en el Golfo de California es producida básicamente por cooscilación con la marea del pacífico. Esto quiere decir que las variaciones del nivel del mar dentro del golfo se deben principalmente al forzamiento hidráulico inducido por las variaciones del nivel del mar en la entrada del golfo, más que a la atracción gravitatoria diferencial directa del Sol y la Luna sobre las aguas del GC (Ripa y Velásquez, 1993).

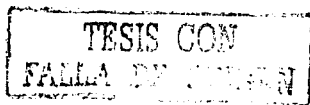
Mediciones de la variación del nivel del mar realizadas en tres localidades a lo largo del GC - Cabo San Lucas en la boca, Santa Rosalía en la parte central y San Felipe en la parte norte -, respectivamente, permiten observar e identificar varias características de las mareas en esta región: 1) el nivel del mar sube y baja aproximadamente una o dos veces por día. 2) El rango de marea (diferencia entre marea alta y marea baja) cambia a lo largo del mes produciendo 'mareas vivas', cuando el rango de mareas es máximo y 'mareas muertas', cuando el rango de mareas es mínimo. 3) El rango de mareas se incrementa de la boca (Cabo San Lucas) a la cabeza (San Felipe). 4) Las mareas semidiurnas dominan en la boca y en la cabeza, pero no así en Santa Rosalía, donde dominan las mareas diurnas (Marinone y Lavín, 1997)

Los promedios mensuales del nivel del mar en el GC presentan un fuerte ciclo estacional, con máxima elevación en verano y mínima en invierno (Roden y Groves, 1959).

La circulación del GC está determinada por las mareas, los vientos, la distribución de la densidad del agua de mar y el intercambio de calor y agua con la atmósfera y con el Océano Pacífico nororiental.

Parte de la energía mecánica que el viento suministra al mar a través de la superficie, genera corrientes que forman parte del sistema de circulación. En GC los vientos tienen un marcado ciclo estacional, y además las cadenas montañosas en ambos lados del golfo canalizan el viento a lo largo del mismo. El viento sopla del noreste durante el invierno y del sureste en el verano. Claramente, el esquema de los vientos es conducente a generar surgencias costeras del lado del continente en el invierno y del lado de la península en verano (Lavín y cols, 1997).

La circulación termohalina resulta de los flujos de calor y de agua (evaporación y precipitación) a través de la superficie. Estos flujos cambian la densidad del agua en las capas superiores del golfo de California, y como son muy



diferentes en el océano pacífico, la diferencia de densidad genera un gradiente de presión, que es la fuerza motriz de la circulación termohalina. En el GC la circulación termohalina media es controlada por el carácter evaporativo y de ganancia neta de calor: estas características dictan que forzosamente debe haber una salida de agua tibia y salina cerca de la superficie (Bray, 1988) y una entrada compensatoria de agua sub- superficial.

## **APLICACIÓN DE PERCEPCION REMOTA EN EL ESTUDIO DE LA TSM EN EL GOLFO DE CALIFORNIA**

En el Golfo de California se han desarrollado diversos estudios de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM), por medio de imágenes de satélite, aunque en su mayoría sólo han sido utilizadas como información complementaria de otros estudios específicos, en los que no se hace un análisis a fondo de la TSM.

Por otra parte los trabajos publicados sobre la TSM en el Golfo de California dividen a éste en 4 zonas geográficas, por sus características: a) zona norte, donde las temperaturas oscilan de 10° a 32° C de invierno a verano (Sverdrup,1941), b) Región islas, delimitada al sur por un umbral. Constituye una de las características topográficas más sobresalientes del golfo, donde se encuentran las temperaturas superficiales más bajas debido a la intensa mezcla por marea (Argote y cols,1985); c) región central, la TSM muestra una marcada diferencia entre invierno y verano, alcanzando valores de 16° y 31° C, respectivamente (Robles y Marinone,1987); y d) región sur o boca, que esta en comunicación abierta con el océano pacífico tropical a través de la boca. Tiene una estructura complicada debido a la confluencia de distintas masas de agua.

En la figura 2.4 se muestra la estructura espacial de la climatología de la TSM en el Golfo agrupada en las cuatro estaciones de año, publicada por Soto y colaboradores en 1998, en ella describe que ocurren mínimos de temperatura para todo el golfo en los meses de invierno (especialmente en enero y febrero) y los máximos en los meses de verano (especialmente agosto y septiembre). Sin embargo la estructura espacial de la climatología es diferente para las 4 zonas. En la zona norte durante el invierno se observan giros cálidos y anticiclónicos y durante el verano, giros fríos y ciclónicos. En la zona de las islas, en particular alrededor de la isla Ángel de la Guarda, se observa durante el invierno una orientación de las isotermas tal que sugiere una circulación anticiclónica alrededor de ésta. La zona de las islas se caracteriza, en general, por mostrar las menores temperaturas del golfo. Al sur de las islas se observan fuertes gradientes de temperatura con climatología de TSM mayor en el continente que en la península. Esto sugiere que durante la mayor parte del año excepto en noviembre y diciembre, la circulación superficial del golfo es en dirección noroeste.



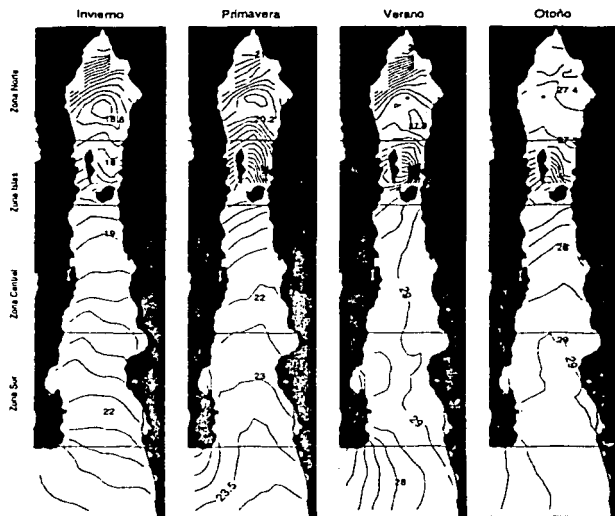


Figura 2.4 Estructura espacial de la temperatura superficial del mar para las cuatro estaciones del año. Note que para las regiones sur y central el intervalo de contorno es de 0.5°C y para las regiones norte y de las islas es de 0.1°C. Tomado de Soto y Cols., 1998

En las regiones central y sur, se observa que en los meses de invierno las isotermas tienden a orientarse hacia la región del continente, mostrando aguas más frías en esta región. En los meses de verano la estructura espacial de temperatura muestra, en forma más evidente, la presencia de aguas más cálidas en el lado del continente y más fría en el lado de la península. En los meses de otoño y primavera la estructura de las isolíneas tienen una estructura similar entre sí, sugiriendo una transición de circulación anticiclónica en invierno y ciclónica en verano.

## CAPITULO III

### *Registro de la Temperatura de la Superficie del Mar por Medio de radiómetros Satelitales*

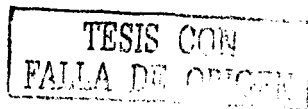
Las imágenes obtenidas con radiómetros montados en los satélites de órbita polar o geoestacionarios son una poderosa herramienta para el registro sistemático de la *temperatura de la superficie del mar* (TSM) y para el estudio de diversos procesos del océano que ocurren en su estrato superficial. El atributo principal de esta información reside en la extensión de su distribución espacial, del orden de  $10^7$  km<sup>2</sup> por imagen y una frecuencia de 2 a 6 imágenes diarias.

#### **LOS SENSORES AVHRR DE LOS SATÉLITES NOAA**

Uno de los dispositivos más utilizados para la obtención de imágenes de la TSM es el radiómetro conocido como “radiómetro avanzado de muy alta resolución” (Advanced Very High Resolution Radiometer; AVHRR, por su nombre y siglas en inglés). Estos instrumentos de precisión se han montado a bordo de satélites de órbita polar para registrar radiación la que proviene de la superficie de la Tierra y de su atmósfera en cinco bandas del espectro electromagnético.

#### **Características de los satélites NOAA**

La serie de satélites NOAA, financiada y administrada desde 1970 a la fecha por el gobierno federal de los Estados Unidos de Norteamérica a través de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (National Oceanic Atmospheric Administration; NOAA, por su nombre y siglas en inglés), consiste de casi una docena de satélites (de los cuáles los primeros nueve ya han dejado de funcionar), de órbita casi polar, forman un ángulo con respecto al eje terrestre de 98°. Estos satélites circundan la tierra en una órbita conocida como heliosincrónica. Esto es, el plano orbital del satélite polar permanece fijo con relación al sol (Aguirre, 2002). una vuelta a la Tierra tiene un periodo cercano a 102 minutos, a una altura aproximada de 850 Km sobre la superficie terrestre. en un día el satélite orbita la tierra 14 veces. Estos satélites están diseñados para ofrecer un ciclo o frecuencia de cobertura corto, equivalente a una imagen de



(casi) el mismo escenario cada doce horas. Este ciclo se mejora a seis horas o menos gracias a la sincronización entre los satélites que operan simultáneamente.

En la actualidad se encuentran orbitando alrededor de la Tierra y en operación los satélites NOAA-12, NOAA-14, NOAA-15 y NOAA-16. El primero se puso en órbita 1986, el segundo en 1991, el tercero en 1998 y el último 2001. Desde la fecha de su lanzamiento el NOAA-15 tuvo algunos problemas técnicos en la transmisión de datos pero finalmente se logró su reparación en septiembre de 2001.

### Características de los radiómetros AVHRR

Los radiómetros AVHRR han sido diseñados para proporcionar imágenes con las siguientes características:

a) *Resolución espectral* en 5 bandas del espectro electromagnético:

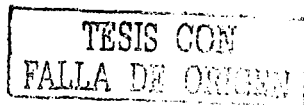
Banda 1	visible	0.58 - 0.68 $\mu\text{m}$
Banda 2	infrarrojo cercano	0.725 - 1.1 $\mu\text{m}$
Banda 3	infrarrojo medio	3.55 - 3.93 $\mu\text{m}$
Banda 4	infrarrojo térmico	10.3 - 11.3 $\mu\text{m}$
Banda 5	infrarrojo térmico	11.5 - 12.5 $\mu\text{m}$

b) *Resolución espacial*: 1.1 km (en el nadir) a 6 km (en los bordes de la imagen), con una cobertura aproximada de 2800 km de ancho (en dirección transversa a la órbita del satélite), por casi 5400 km de largo en cada paso por la zona de recepción de la antena.

c) *Resolución radiométrica*: 10 bits, equivalente a 1023 niveles distintos.

d) *Resolución temporal*: 2 imágenes diarias de casi la misma escena por satélite.

Para nuestras latitudes y ubicación de la antena (Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad de México), el satélite NOAA-12 tiene sus horas de paso en promedio a las 00:30 y 13:00 horas GMT (Greenwich Meridian Time, por sus siglas en inglés) y el NOAA-14 tiene sus horas de paso en promedio a las 09:00 y a las 20:30 horas GMT. Los satélites NOAA-15 y NOAA-16 pasan a las 01:00 y 13:30 GMT el primero y a las 09:30 y 21:00 GMT, el segundo. Estos últimos satélites van a sustituir eventualmente a los dos primeros. La "vida útil" de los satélites NOAA ha sido muy variable, desde varios meses hasta casi 15 años.



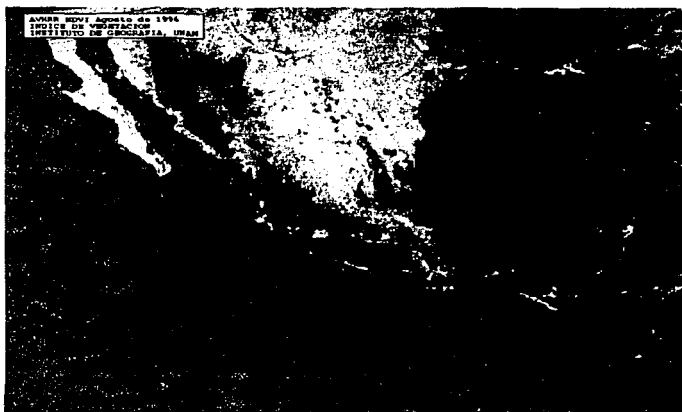
### Aplicaciones principales de las imágenes AVHRR.

Los radiómetros AVHRR fueron diseñados primordialmente para aplicaciones meteorológicas, pero han demostrado ser muy valiosos en una serie de aplicaciones en la observación de la superficie de la Tierra, relacionadas en su mayoría con la evolución y variabilidad de la biosfera. Las aplicaciones de estas imágenes las podemos enmarcar en tres grandes ámbitos: atmósfera, océanos y superficie terrestre.

Las aplicaciones atmosféricas son en estudios de nubosidad, vientos, flujos radiativos, trayectorias de huracanes y evolución del clima global. Las aplicaciones para el océano se concentran en estudios de la distribución de la temperatura de la superficie del mar, la identificación y localización de surgencias, trayectorias de estructuras térmicas como vórtices y anillos "calientes" y "fríos" y estimaciones de la turbidez del agua y su concentración de sólidos suspendidos. Las aplicaciones de cobertura terrestre consisten en la delimitación de zonas de nieve, humedales, pantanos, detección y seguimiento de incendios, deforestación y determinación de índices de vegetación.



a) Temperatura de la Superficie del Mar



b) Índice de la vegetación

Figura 3.1 Ejemplos de aplicaciones de los datos obtenidos por los sensores AVHRR. Inciso (a) Temperatura de la Superficie del Mar, imagen compuesta de los meses de enero, para el periodo 1996-2001. Inciso (b) Índice de Vegetación, para el mes de agosto de 1996. Imágenes procesadas en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología e Instituto de Geografía de la UNAM respectivamente.

### **ALGORITMOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL MAR A PARTIR DEL REGISTRO RADIOMÉTRICO.**

El océano esta permanentemente intercambiando momentum (cantidad de movimiento), energía (radiación y calor) y masa (evaporación, lluvia, polvo y gases de invernadero) con la atmósfera. Específicamente, el estado de agitación molecular de la superficie del mar, esa capa de unas micras de espesor conocida como la “piel”del océano, modula la cantidad de radiación electromagnética que entra y sale del océano, la cantidad de agua que se evapora y la cantidad de calor que por conducción intercambian el aire y el mar. (Gallegos y cols, 1996).

Desde 1970 se empezaron a usar datos de la radiación infrarroja emitida por la piel del océano para estimar la temperatura de la superficie del mar desde el espacio. Las técnicas para estimar a TSM están sustentadas en la física de la radiación de los cuerpos ‘negros’ y ‘grises’. Es decir, se fundamentan en que el movimiento molecular de todas las sustancias a temperaturas mayores que el cero absoluto produce la emisión de radiación y que un cuerpo ‘negro’ a cualquier

temperatura absorbe completamente todas las ondas electromagnéticas que inciden sobre él.

Los objetos reales no absorben perfectamente la radiación incidente. No obstante, por las propiedades ópticas particulares algunos se acercan a la condición de cuerpo negro. La *emisividad* de un objeto real se define como la proporción de la cantidad de radiación emitida por el objeto con relación a la que emite un cuerpo negro (emisor perfecto) a la misma temperatura.

Si se conoce la emisividad de un cuerpo y se mide la radiación emitida por él, entonces se puede determinar la temperatura real de la superficie de ese cuerpo.

La siguiente figura muestra el espectro de radiación de un cuerpo negro a 300 K y la radiación solar reflejada por la superficie del mar, a la misma temperatura. Se muestran también las cinco bandas del espectro electromagnético a las que es sensible el radiómetro tipo AVHRR.

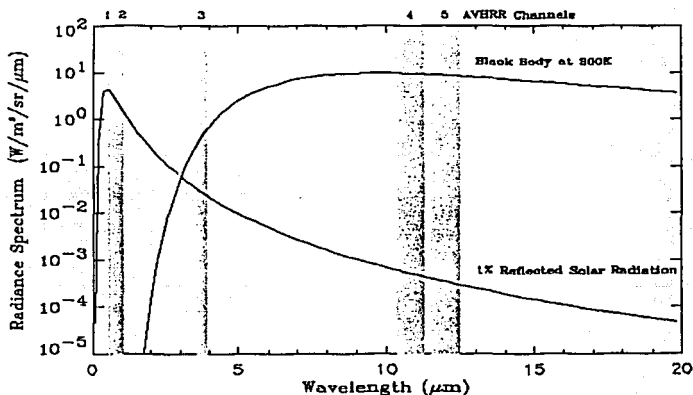


Figura 3.2 Tomado de Frank Monaldo, 1996.

Los radiómetros tipo AVHRR instalados a bordo de los satélites NOAA miden selectivamente, en las 5 bandas (que aparecen sombreadas en la figura mostrada aquí arriba), la radiación electromagnética que les llega de la piel del océano, de la región del mar que está en el campo de visión – la escena –, del sensor. Esta es la 'radiación directa', la que se quiere medir para estimar con certidumbre la TSM. Infortunadamente parte de esta radiación directa no llega al sensor por la presencia de la masa atmosférica, particularmente las nubes entre el mar y el



sensor. Esta masa de aire *dispersa, refleja y absorbe* en proporciones muy variables la radiación directa del mar, razón por la que no llega al radiómetro toda la radiación directa que emite la superficie del mar. Por otro lado, el aire y las nubes emiten asimismo radiación correspondiente a su propia temperatura y ésta queda también registrada en el sensor satelital. El radiómetro registra, además, por efectos de dispersión y reflexión, radiación de la superficie del mar y de la atmósfera vecina pero fuera de su campo de visión directa. En resumen, la radiación neta que registra el radiómetro en todo momento está *contaminada* irremediadamente por radiación distinta a la que proviene directamente de la superficie del mar dentro de su campo de visión. Sin embargo y por fortuna, esta contaminación es distinta para cada banda de longitud de onda que mide el sensor. Para 'limpiar' el registro neto de la radiación se hacen manejos matemáticos con las señales codificadas en cada una de las 5 bandas (precisamente para este propósito se usan las diferentes bandas de recepción) para 'filtrar' la radiación contaminante hasta donde sea posible. A éstas se suman comparaciones razonadas entre mediciones *in situ* y las mediciones del sensor AVHRR, para 'calibrar' y mejorar el procedimiento de la estimación radiométrica de la TSM. Los radiómetros tipo AVHRR, captan la radiación en 5 bandas de longitud de onda (o su equivalente en bandas de frecuencia). Los canales 1 y 2 miden el reflejo de la radiación solar en las regiones "visibles" e infrarrojo cercano" respectivamente. Los canales 3, 4 y 5 son los que reciben la radiación emitida por la superficie de la tierra. El canal 3 es menos sensible al vapor de agua atmosférico. Sin embargo, este canal admite una cantidad considerable de radiación solar reflejada. Por consiguiente éste se usa principalmente por la noche. Por lo que respecta a los canales 4 y 5, éstos son más afectados por el vapor de agua, pero no se contaminan de la radiación solar reflejada por la superficie. Así, por medio de una "combinación juiciosa" de los registros de radiación de los canales 3, 4 y 5 se puede lograr una "estimación razonada" de la TSM.

Se ha desarrollado diversos algoritmos para determinar la TSM en el nadir y en regiones sin nubes; Por ejemplo el siguiente, que tiene la forma:

$$T_s = A_0 T_i + A_1 (T_i - T_j) + A_2$$

Donde  $T_i$  y  $T_j$  son las temperaturas de brillo determinadas a partir de los valores de radiación en los canales infrarrojos 3, 4 y 5, en donde  $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$  son "coeficientes de radiación", calculados en base a comparaciones y ajustes estadísticos de las mediciones realizadas. En este caso la constante,  $A_0$  es cercana al valor 1, lo que sugiere que para la -temperatura del canal  $T_i$ , ésta es cercana a la 'verdadera' temperatura de la superficie del mar,-  $A_1$  es una corrección de temperatura por transmisión atmosférica y,  $A_2$  es un factor de corrección asociado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

con las diferencias atmosféricas de las temperaturas de brillo que 'midén' los diferentes canales.

Las siguientes tablas muestran los parámetros utilizados por el sistema TeraScan para computar la TSM con los algoritmos: 'Split-window', 'Dual-window' y 'Triple-window', respectivamente. Estos coeficientes son validos para temperaturas en grados Kelvin y Celsius.

Satellite	Time	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4(K)$	$A_4(C)$
poaa-14	D	1.017342	2.139588	0.779706	0.000	-5.280	-0.549
poaa-14	N	1.029088	2.275985	0.762567	0.000	-9.090	-1.145
poaa-12	D	1.013674	2.443474	0.314312	0.0	-4.647	-0.912
poaa-12	N	1.013674	2.443474	0.314312	0.0	-4.647	-0.912
poaa-11	D	1.01345	2.659762	0.526648	0.0	-4.592	-0.918
poaa-11	N	1.052	2.397089	0.959766	0.0	-15.52	-1.316
poaa-9	D	0.9994	2.7057	-0.27	0.73	0.1177	-0.046
poaa-9	N	0.9994	2.7057	-0.27	0.73	0.1177	-0.046
poaa-7	D	1.0346	2.5779	0.0	0.0	-10.05	-0.60
poaa-7	N	1.0346	2.5779	0.0	0.0	-10.05	-0.60
poaa-10	D	1.1	0.0	0.0	0.0	-27.316	0.0
poaa-10	N	1.1	0.0	0.0	0.0	-27.316	0.0
poaa-8	D	1.1	0.0	0.0	0.0	-27.316	0.0
poaa-8	N	1.1	0.0	0.0	0.0	-27.316	0.0
poaa-6	D	1.1	0.0	0.0	0.0	-27.316	0.0
poaa-6	N	1.1	0.0	0.0	0.0	-27.316	0.0

Satellite	Time	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4(K)$	$A_4(C)$
poaa-14	N	1.008751	1.409936	0.000000	1.976	-0.764	1.626
poaa-12	D	1.017736	0.426693	1.800916	0.0	-3.114	1.731
poaa-12	N	1.017736	0.426693	1.800916	0.0	-3.114	1.731
poaa-11	D	1.03432	1.347423	0.953042	0.0	-7.64	1.73
poaa-11	N	1.03432	1.347423	0.953042	0.0	-7.64	1.73
poaa-9	D	1.014	0.5118	0.958	1.55	-2.224	1.60
poaa-9	N	1.014	0.5118	0.958	1.55	-2.224	1.60
poaa-10	D	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12
poaa-10	N	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12
poaa-8	D	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12
poaa-8	N	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12
poaa-7	D	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12
poaa-7	N	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12
poaa-6	D	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12
poaa-6	N	1.009	1.502	0.0	-1.2	-2.58	-0.12

Satellite	Time	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4(K)$	$A_4(C)$
poaa-14	N	1.010037	0.920822	0.000000	1.760	2.214	0.528
poaa-12	N	1.058532	1.016347	0.0	2.081917	-3.407	12.58
poaa-11	N	1.036027	0.892857	0.520056	0.0	-9.224	0.617

Basado en comparaciones empíricas de datos AVHRR y valores *in situ*, McClain y Bernstein, en 1985 formularon dos algoritmos que combinan los

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

valores de radiación de tres canales infrarrojos, uno para datos de noche y otro para datos de día. Los algoritmos usados por la noche pueden emplear el canal 3. Para el algoritmo de día, el canal 3 contiene reflexión de la luz del día, y sólo la combinación de los canales 4 y 5 es útil. (Monaldo, 1996).

En general existen tres clases de algoritmos para la determinación de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM).

$$\text{Split (mc), } TSM = A_0 T_{11} + A_1 (T_{11} - T_{12}) + A_2 (T_{11} - T_{12}) (\sec \theta - 1) + A_3 \sec \theta + A_4$$

$$\text{Dual (bz), } TSM = A_0 T_{11} + A_1 (T_{3,7} - T_{11}) + A_2 (T_{3,7} - T_{11}) (\sec \theta - 1) + A_3 \sec \theta + A_4$$

$$\text{Triple (tw), } TSM = A_0 T_{11} + A_1 (T_{3,7} - T_{12}) + A_2 (T_{3,7} - T_{12}) (\sec \theta - 1) + A_3 \sec \theta + A_4$$

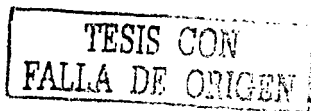
El algoritmo Split-window usa la temperatura de brillo del canal  $T_{11}$  como el orden de estimación más bajo de la temperatura de la TSM y la diferencia  $T_{11} - T_{12}$  para correcciones atmosféricas. El algoritmo Dual-window usa la temperatura de brillo del canal  $T_{11}$  y la diferencia  $T_{3,7} - T_{11}$  para las correcciones atmosféricas. Finalmente, el Triple window usa la temperatura de brillo del canal  $T_{11}$  y la diferencia  $T_{3,7} - T_{12}$  para correcciones atmosféricas. En las tres ecuaciones  $\theta$  es el ángulo del cenit del sensor.

## PROCESAMIENTO DE IMÁGENES AVHRR EN EL SISTEMA TERASCAN

El análisis de las imágenes multispectrales obtenidas por diversos sensores multicanal, como son los AVHRR, instalados en satélites, ha tenido un gran auge en los últimos 25 años. Al manipular una imagen por medio de una computadora se dice que se realiza un 'procesamiento digital de la imagen'. En dicho proceso el *modo de entrada* es una imagen y el *modo de salida* es otra imagen, mejorada tanto visual como estructuralmente, para su mejor análisis. Hoy en día existen diversos sistemas expertos que permiten la captura y facilitan el procesamiento, el análisis y la síntesis de las imágenes satelitales; y específicamente de las de la TSM.

### Introducción al sistema TeraScan

En 1995, los Institutos de Geografía (IG.) y de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la UNAM compraron una estación receptora de imágenes de satélite con el propósito fundamental de recibir, procesar, analizar y organizar un acervo de información proveniente de los sensores AVHRR montados en los satélites NOAA. Tal estación cuenta con una antena parabólica con un plato de un metro de diámetro, conectada a un sistema de control y a un receptor de señal. Éstos son controlados por una estación de trabajo UNIX que se opera con una



codificación específica con licencia de uso (Gallegos y Cols, 1996; Gómez y Bonifaz, 1996).

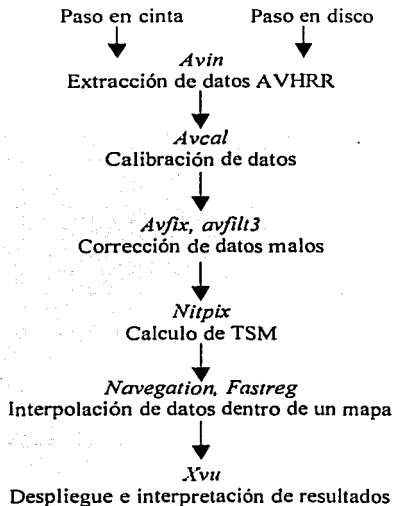
### Captura y proceso datos AVHRR.

Para capturar los datos registrados por el sensor AVHRR es necesario determinar los pasos de los satélites NOAA. El paso del satélite lo definimos como el periodo de duración y el área geográfica registrada (escena) mientras que el satélite es visible desde el sitio de recepción. El paso obviamente depende de la ubicación de la antena.

En el sistema TeraScan la captura de los datos se hace forma automática y sistemática y tiene la capacidad de almacenar hasta 5 pasos de manera simultánea en un disco. En cada nueva captura de datos, el sistema sustituye el paso 'más viejo' por el paso actual. Éstos son seleccionados previamente según la bitácora de pasos de cada satélite NOAA.

Los datos que recibe la estación de la UNAM cubre todo el país, incluyendo la Zona Económica Exclusiva de México (ZEEM), casi todo Centroamérica y el Mar Caribe y llega hasta el centro-este de Estados Unidos de Norteamérica, incluyendo la región de los grandes lagos.

El procesamiento en el sistema TeraScan, tiene el siguiente procesamiento en línea:



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

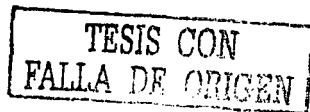
- Se extraen los datos crudos AVHRR captados de la antena en formato HRPT (High Resolution Picture Transmisión). Esto se logra utilizando el comando *avin* que esta diseñado para extraer los datos del disco o cinta donde se almacenas los datos AVHRR de forma automática.
- Estos datos son convertidos a valores de unidades de albedo y brillo con el comando *avcal*. Este proceso invoca la calibración de los datos radiométricos.
- Se procede luego a realizar las correcciones necesarias a la imagen con los comandos *avfix* y *avfilt3*, que rempazan líneas 'malas' o carentes de datos, con las líneas 'buenas' más cercanas y se reduce el ruido producido en el canal 3 por medio de un filtro de alta frecuencia.
- Se aplican los algoritmos necesarios para el calculo de la TSM. Esto se hace con el comando *nitpix*, que aplica las correcciones necesarias para discriminar los 'pixeles contaminados' con nubes y admite sólo los 'pixeles limpios'.
- Un vez obtenida la imagen con valores de TSM, se procede entonces a geo-referenciarla con respecto a una base de datos geográficos previamente establecida. Este procedimiento se conoce como 'navegación'. Esto se logra de forma manual o automática, con los comandos *navboxes* y *navigate*. Una vez 'navegada' (georeferenciada) la imagen, se procede a registrarla con el comando *fastreg*, que ingesta, acomoda o adapta a la imagen a una área geográfica establecida. Para el caso de esta tesis, el área geográfica es la del Golfo de California.

### Obtención de la temperatura de la superficie del mar

Para obtener la imagen TSM en el sistema TeraScan, se hace uso del comando *nitpix*, este comando realiza los procedimientos necesarios para la obtención de la TSM involucrando las correcciones atmosféricas necesarias e involucra el algoritmo elegido para la obtención de la TSM.

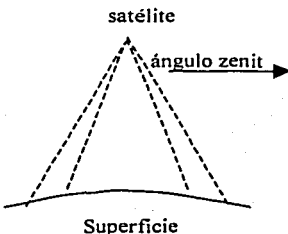
Parámetros involucrados en el comando *nitpix*:

- *sst\_method* (selección de algoritmo)  
En este parámetro se selecciona el algoritmo para la obtención de la TSM, los algoritmos a elegir son *dual\_window*, *triple\_window* y *split\_window* que fueron previamente explicados en este capitulo.



- *Cos\_sat\_zen* (exclusión de datos)

En este punto se especifica el valor máximo del coseno del ángulo del zenit del satélite, esto con el propósito de eliminar los valores a los extremos de la imagen, el sistema considera el valor de 0.6 que corresponde a un ángulo aproximado de 53.13 grados. Con el propósito de tener el mayor número de valores en cada imagen se utiliza 0.4 que corresponde a 66.42 grados.



- *Ch4\_delta* (diferencia del canal 4)

Asumiendo que la TSM varía lentamente, entonces una variación grande en una región local puede indicar la presencia de nubes. Este parámetro lo que hace es dividir la imagen en matrices de 3x3 y el usuario asigna el máximo valor absoluto de la diferencia entre los pixels de esta matriz. Se recomienda que estos valores sean 2.5 para una imagen de día y de 1 para una imagen de noche. Si se excede de los valores asignados por el usuario, se asume que la región seleccionada está nublada.

- *Ch2\_max* (máximo valor de albedo del canal 2)

Un valor grande de albedo en el canal 2 de la imagen puede indicar la presencia de nubes, si el albedo de un píxel excede al 8% para una imagen de día o 2% para una de noche entonces el píxel se marca como nube.

- *Ch2\_delta* (diferencia del canal 2)

Una variación local grande de albedo también indica presencia de nubes. Si dentro de una región o matriz la diferencia de píxel excede al valor especificado por el usuario, se asume que el elemento de los datos está nublado. Esta prueba se utiliza solo para las imágenes de día.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- *Ch3\_minus\_ch4* (diferencia del canal 3 y 4)  
Los canales 3 y 4 absorben proporciones significativamente diferentes de vapor de agua, si una diferencia grande de brillo de temperatura entre estos canales es una indicación de contaminación de nube. Subsecuentemente el canal 3 puede tener luz de sol reflejada, este parámetro sólo se usa por la noche.
- *Base\_Temp* (base de temperatura)  
Este parámetro se refiere a una base de temperatura, usada en la escala de temperaturas real, empleando valores con 8-bits (un byte de información). Por ejemplo, si nosotros consideramos una base de temperatura de 10 grados con un incremento de 0.1 de grado, el primer valor de la escala sería 10°, el segundo 10.1°, el tercero 10.2°..., hasta completar los 256 valores incluido el cero que se puede representar con un byte de información. (2<sup>8</sup>=256) que correspondería en valores de temperatura a 35.5°.
- *Temp\_step* (incremento de temperatura)  
Este parámetro se refiere a el incremento de la temperatura real, este incremento esta dado por el usuario, este parámetro y en anterior sirven para controlar la escala de temperaturas de la imagen TSM.
- *Min\_ch4\_Temp* (mínima temperatura del canal 4)  
Cuando el valor de temperatura de brillo del canal cuatro es demasiado baja asumimos que estamos viendo temperaturas de nubes altas. En el procesamiento de imágenes nosotros no usamos esto como una prueba estricta de eliminación de nubes, aceptamos todos las temperaturas arriba de los 0° Celsius.
- *Min\_sun\_reflect* (ángulo mínimo de reflexión solar)  
El parámetro de ángulo mínimo de reflexión solar, es el ángulo (en grados) mínimo aceptable entre el reflejo del brillo del sol y el ángulo de mira del sensor 0°, valores menores a este valor especificado por el usuario será clasificado como brillo de sol y el píxel no será utilizado en el proceso de los algoritmos.

Los parámetros empleados, en las imágenes del sensor AVHRR de los satélites NOAA 14 y 12 son:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para su paso nocturno Terascan% nitpix

Sst_method	mc
Cost_sat_zen	0.4
Ch4_delta	1.0
Ch2_max	2.0
Ch2_delta	0.25
Ch3_minus_ch4	-1.5
Base_temp	10
Temp_step	0.1
Min_ch4_temp	0
Min_sun_reflex	0

Para su paso de diurno Terascan% nitpix

Sst_method	mc
Cost_sat_zen	0.4
Ch4_delta	2
Ch2_max	8
Ch2_delta	1
Ch3_minus_ch4	0
Base_temp	10
Temp_step	0.1
Min_ch4_temp	0
Min_sun_reflex	0

### Recorte de la imagen en un área específica (master).

Como se menciono, una imagen NOAA/AVHRR cubre grandes áreas (5400 x 2800 km.), por lo que se hace necesario recortar las imágenes en regiones geográficas de nuestro interés. Esto se hace creando un 'master', el cual genera un mapa con sus coordenadas geográficas en una proyección cartográfica definida por el usuario. El siguiente paso es registrar las variables de la imagen en el mapa y proyección definidos, este proceso lo hace el comando *fastreg*.

### Exportación de datos de TeraScan a otros sistemas

Cuando utilizamos sistemas expertos para el procesamiento de imágenes, estos generan sus propios formatos para el despliegue de datos, y el sistema TeraScan no es la excepción.

Cuando procesamos una imagen, lo que hacemos, es trabajar sobre una matriz de valores o datos que modificamos con cada proceso y que finalmente esta matriz la desplegamos de modo grafico, al asignar colores, a cada valor de la

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



matriz, para obtener lo que denominamos una imagen en falso color. Al desplegar una imagen en falso color, esta imagen se despliega en el formato del sistema, TeraScan genera su propio formato de despliegue, pero una vez desplegada la imagen esta se puede salvar y exportar en formato sunraster. El sistema TeraScan nos permite exportar los datos de la matriz en dos formatos, *ascii* y *binario* formatos que la mayoría de los sistemas pueden utilizar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO IV

### *Despliegue Cartográfico de la Temperatura de la Superficie del Mar del Golfo de California*

Para realizar un análisis de las imágenes TSM, es necesario desplegar éstas en forma de mapa, con elementos cartográficos de lenguaje y diseño gráfico, que nos permitan una mayor certidumbre en el análisis de la distribución espacial y temporal de la temperatura de la superficie del mar.

#### ELEMENTOS CARTOGRÁFICOS

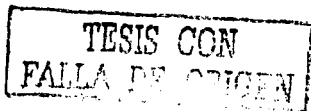
Los elementos cartográficos están en función del propósito del mapa y sus características. Un mapa y/o carta es una representación simplificada, generalizada de la realidad. Aun cuando es posible establecer reglas y procedimientos en la generación de mapas, siempre habrá lugar para la subjetividad o creatividad del cartógrafo, quien en última estancia le dará cierto sello al o a los mapas elaborados.

En el presente trabajo, para poder realizar un análisis cartográfico de la TSM se consideraron cuatro elementos principales: proyección cartográfica (mercator), simbología (colores), "mallas" o capas de información complementaria y "mascara" de datos. Los cuales se explican con mayor énfasis en el capítulo I.

#### Proyección Mercator

Esta proyección es una proyección cilíndrica, en la que el cilindro es tangente en el ecuador (eje del cilindro orientado en dirección norte-sur), por lo que carece de distorsiones en el ecuador y se acrecentan en dirección a los polos, los meridianos son líneas rectas equidistantes, los paralelos son líneas rectas que se van separando hacia los polos; y la intersección de las líneas forman ángulos rectos.

Una de las características de esta proyección, es que la representación de un azimut constante se representa con una línea recta a la que se le denomina loxodrómica, es por esta característica por la que es usada en cartas náuticas. Y es el motivo por el que se emplea en esta trabajo.



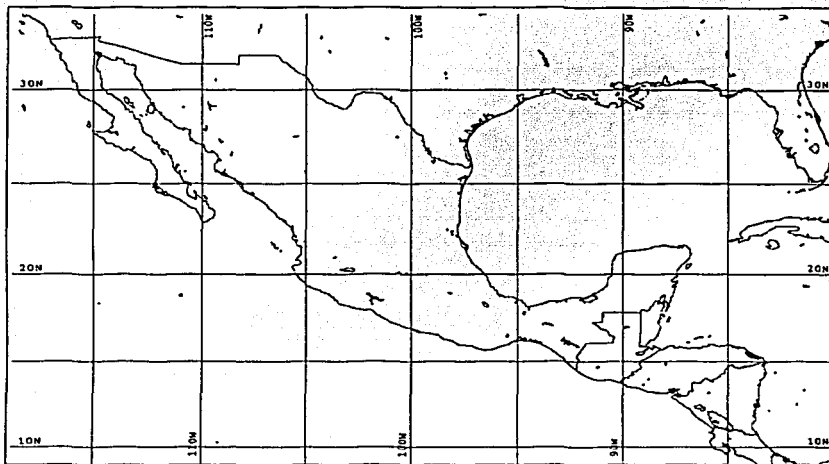


Figura 4.1 Mapa de la República Mexicana en proyección Mercator

## Simbología

Recordando algunos criterios para la elección de símbolos descritos en el capítulo I, estos deben de ser claros, sencillos, fáciles de dibujar y sobre todo deben dar una idea del atributo que representan.

El representar variables físicas como la temperatura se hace complicado, y más aun, si consideramos sus cambios espaciales y temporales. La elección de símbolos convencionales en forma de puntos, líneas y figuras, no representarían en su totalidad estos cambios, por lo que la mejor simbología para la representación de la temperatura tanto espacial como temporalmente es el empleo de colores, ya que estos ofrecen una gran gama de tonos a los que se les puede asignar un valor de temperatura y notar los cambios de estos para un mejor análisis.

Cada una de las imágenes digitales puede ser desplegada como una imagen de colores a la que se le denomina imagen en falso color. Para el caso de las imágenes utilizadas para el desarrollo de esta tesis se emplearon 128 colores, distribuidos en un rango de temperaturas de 10° a 35° Celsius, este rango se selecciono debido a que es muy difícil encontrar temperaturas de la superficie del

mar en la zona del Golfo de California y de hecho para la zona económica exclusiva fuera de este rango de temperatura.

Los colores utilizados en la representación de la temperatura están basados en colores primarios RGB (siglas en ingles de rojo, verde y azul), el color azul nos representa la temperatura mas baja  $10^{\circ}$  C para nuestro caso, el color verde representa le valor intermedio  $22.5^{\circ}$  y el color rojo el valor máximo  $35^{\circ}$ , los valores intermedios están representados por la combinación de los colores. Además del color negro que nos representa el valor 0 que significa ausencia de valores (o color).

En términos generales, para describir un color nos referimos a sus tres componente HSL (siglas en ingles de Matiz, Saturación y Luminosidad) que normalmente se escalan de 0 a 1, por lo que pueden ser multiplicados por él numero de colores empleados para determinar la combinación de estos. El sistema Terascan asigna al color rojo como matiz, Verde como saturación y azul como luminosidad.

### **Mallas o capas de información**

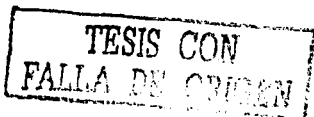
A demás de la simbología para representar la temperatura, es necesario superponer otros elementos cartográficos provenientes de otras fuentes, a los que se denominan "mallas" o capas de información, estos elementos facilitan la interpretación del mapa además de que se realiza un mejor análisis cualitativo. En cada una de las imágenes, para su mejor análisis fueron agregadas la mallas de: líneas de latitud y longitud, línea de costa, y la escala grafica de temperaturas. Todas estas mallas fueron generadas en un mapa base, que tiene las mismas características del master o recorte.

Para las líneas de latitud, longitud y costa se hizo uso, de la base de información que contiene el sistema TeraScan, la cual esta basada en el programa etopos-5, están desplegadas a cada grado de latitud y longitud, cabe mencionar que por cada grado de longitud existen 92 pixeles y por cada grado de latitud varia debido a la proyección empleada (Mercator) pero en promedio para la zona de estudio se tienen 100 pixeles.

### **Mascara de datos**

Para analizar las imágenes se hace necesario 'enmascarar' datos que estén fuera del contexto oceánico, como lo son las nubes y la zona continental (tierra) ya que de no hacerlo podrían influir en el análisis visual de la imagen.

Las imágenes utilizadas fueron enmascaradas a partir de la generación de una matriz de datos, la cual, para representar todo lo que corresponde a agua se le asigno el valor de 1, y todo lo que corresponde a tierra el valor 0.



Posteriormente se realizó una operación lógica, para 'enmascarar' los valores de tierra, La función utilizada es:  $x2 = 0 \parallel 0:x1$  donde:

$x1$  es la variable de la imagen de TSM

$x2$  es la variable de la imagen con valores de 1 y 0

= = igual a

$\parallel$  entonces

Interpretando la función tenemos: si el valor de  $x2 = 0$  (valor de tierra), entonces se sustituyen los píxeles en  $x1$  y si el valor de  $x2 = 1$ , entonces se conservan el mismo valor de  $x1$  (datos de TSM). Esta operación lógica es como la entienden la mayoría de sistemas de información geográfica. De esta forma se eliminan valores de tierra, o mejor dicho, se asignan el valor de 0 a lo que corresponde a tierra y se conservan los valores de TSM. Esta operación se entiende con mayor claridad, como la multiplicación de la imagen  $x1 * x2$ , como 1 corresponde a valores a la zona oceánica al multiplicarlos por los valores de TSM se conservan y como cero (0) corresponde a valores de tierra, los valores en la imagen TSM para esta zona se vuelven ceros. Esta operación se realizó para cada una de las imágenes.

La eliminación de nubes se efectúa desde el proceso, para la obtención de la TSM, el sistema TeraScan asigna asteriscos para representar nubes o ausencia de datos, los cuales se presentan cuando la imagen no cubre el área de estudio en su totalidad.

## GENERACIÓN DE ISOTERMAS

El despliegue de las imágenes en falso color, nos ayuda a realizar un buen análisis de la distribución de temperaturas, pero este análisis depende mucho de la capacidad de observación de cada persona, algunos pueden observar con mayor claridad los cambios de colores que otros. Por lo que se hace necesario anexar a las imágenes líneas que unen valores iguales de temperatura a un cierto intervalo. Estas líneas son denominadas *isotermas*.

Hoy en día existen variados programas que permiten la generación de isolíneas, utilizando diferentes métodos de interpolación o sencillamente uniendo los puntos de igual valor numérico, entre los más conocidos se encuentra el programa *surfer*, a demás de que todos sistemas de información geográfica cuentan con sus propios programas.

El sistema TeraScan, (al que se hizo referencia en el capítulo anterior) permite generar isotermas de dos formas, la primera especificando un valor de diferencia entre valores de cada píxel, es decir, despliega isotermas en donde se generan cambios (especificado por el usuario) de temperatura. El segundo, es uniendo simplemente los valores de igual magnitud que se indican por el usuario o de forma aleatoria.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En las imágenes empleadas para el análisis climatológico de la TSM, se generaron las isotermas a cada dos grados de temperatura en valores enteros, esto para cada una de las imágenes.(ver figura 4.2)

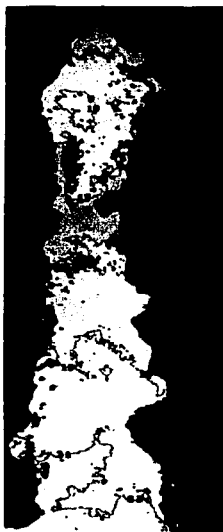


Figura 4.2 Imagen de TSM con isotermas a cada 2° C

## DESPLIEGUE CARTOGRÁFICO

El desarrollo de la cartografía, ha permitido la reproducción de mapas, tanto en papel como en forma digital (despliegue de mapas en una pantalla). Esto a requerido del empleo de aparatos especiales para los gráficos y la adaptación de métodos de representación cartográfica.

### Despliegue en papel.

La reproducción de los resultados de la TSM son representados en forma de diagramas o mapas. Los mapas en papel, por así llamarlos, tienen dos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

funciones principales: son la base de datos de los resultados y son un medio para su despliegue visual. El representar estas dos funciones en un solo elemento (mapa) tiene su problemática.

Tomando en cuenta, la función de que un mapa es una base de datos, mucha de las veces los datos o resultados obtenidos rebasan a los datos que pueden ser representados en su totalidad por los elementos gráficos o signos usados en la construcción del mapa, para mostrara las diferencias y las relaciones existentes entre los datos se hace compleja, sobre todo en el nivel de detalle de lo que se desea representar.

Al realizar un mapa existe la realidad o subjetividad del cartógrafo, y por otro lado la realidad que el usuario detecta, reconoce e interpreta. Hace que existe una perdida de información desde la generación del mapa hasta su interpretación.

### **Despliegue en pantalla (digital).**

Actualmente el avance tecnológico permite desplegar, mapas en la tecnología tradicional del papel como la del "no papel". Es decir, la reproducción de mapas en una pantalla.

La reproducción de los mapas en una pantalla (forma digital) permite poner a prueba ciertas variantes al cambiar el contenido de los mapas y los métodos de modelado. Esto a permitido un aspecto especialmente atractivo cuando se representa la dinámica de fenómenos como la TSM. Esta representación puede darse en forma de películas que podríamos llamar películas cartográficas, donde la sustitución de un mapa por otro, nos permite dar seguimiento al curso de un proceso dinámico. Además es de importancia considerable el hecho de que a partir de la imagen en pantalla se pueda reproducir una copia en papel y es posible reproducir cientos de matices de colores esto hace que el método de representación cartográfica en forma digital tenga mucho éxito.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO V

*Una Climatología de la Temperatura de la Superficie del Mar del Golfo de California*

**ANÁLISIS CARTOGRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS**

El análisis cualitativo de la secuencia de 72 mapas de medias mensuales de la TSM que cubre el periodo de enero de 1996 a diciembre del 2001, y que se presenta a continuación, permite observar rasgos característicos dominantes en la configuración espacial de la TSM a todo lo largo y ancho del GC en estos seis años. Para facilitar y beneficiar la descripción de tales rasgos se divide al GC en cuatro regiones: Alto Golfo, Islas, Centro y Boca (Figura 5.1). En cada una se examina la evolución de la TSM durante las estaciones del año —invierno, primavera, verano y otoño, en este orden— y para cada estación se describen las configuraciones térmicas dominantes en cada región.

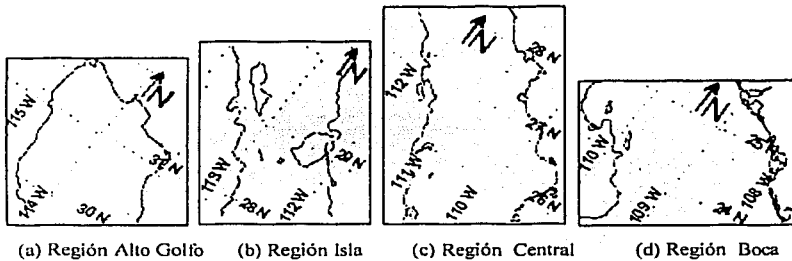


Figura 5.1. Una regionalización viable del Golfo de California que facilita la descripción de las configuraciones mensuales de la TSM observadas en esta cuenca oceánica marginal del Océano Pacífico nororiental en el período 1996-2001.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## Región Alto Golfo.

En el invierno se observan temperaturas bajas en la zona de la desembocadura del Río Colorado –parte norte del Alto Golfo (AG)–, que se extienden a lo largo de las costas tanto de Baja California y Sonora hasta los límites con la Región de las Islas. Se forma así, en el centro del AG, una estructura circular de agua relativamente cálida en la superficie, con temperaturas que difieren hasta en 2 °C respecto a las de las aguas costeras. Aparentemente esta estructura circular se origina por el avance de aguas frías a lo largo de las costas, envolviendo aguas cálidas en el centro del AG, entre las latitudes de 30 °N a 31 °N. Registros del movimiento de cuerpos de deriva realizados en marzo de 1996 (Lavin, *et al*; 1997) confirman la evolución de un giro superficial anticiclónico en el centro del AG. Tal circulación explica la presencia de aguas en superficie relativamente frías, observadas a lo largo de las costas del AG. Esta conformación térmica se observa con mayor claridad en los meses más fríos (enero y febrero) de todos los años analizados, a excepción de 1998, año en el que ocurrió El Niño 1997-98.

Durante el periodo de la transición de primavera ocurre un calentamiento que comienza en la parte norte del AG, en la desembocadura del Río Colorado, y que avanza hacia al sur, bordeando las costas, hasta encontrarse con las aguas frías de la Región de las Islas. Tal proceso forma una configuración superficial en forma de herradura en cuyo centro se registran temperaturas de más de 2 °C de diferencia respecto a las de las aguas costeras. Se observa también un rápido ascenso de la TSM, de 2 –3 °C/mes, en cada año del periodo 1996-2001. En el mes de marzo se observa un calentamiento de la TSM de 19 °C a 21 °C, en abril de 21 °C a 25 °C y mayo de 25 °C a 28 °C. En el año de 1999, año inicial de La Niña 1999-2000, el calentamiento en abril fue notoriamente menor, tanto en magnitud como en rapidez: de 15 °C a 19 °C; y en el mes de mayo solamente de 17 °C a 21 °C.

En los meses de verano la TSM tiende a la homogeneidad en todo el AG. Sin embargo en su parte norte –entre la latitud norte 30.5° y la desembocadura del Río Colorado– las temperaturas de superficie alcanzan valores de 31 °C a 33 °C. y la configuración en forma de herradura, observada en la primavera, se cierra formando un núcleo de temperatura entre 1 – 2 °C más baja en la parte central del AG. Esta diferencia se desvanece en agosto y septiembre.

En el periodo de transición de otoño el enfriamiento de las aguas comienza en la parte norte del AG. Las imágenes sugieren que las aguas frías avanzan, o bien que el enfriamiento procede, a lo largo de las costas de Baja California y Sonora, formando nuevamente una estructura de herradura como en el periodo de transición de primavera, solamente que ahora con aguas frías. Esto ocurre en los dos primeros meses de este periodo de transición. Entrado el mes de diciembre se cierra la configuración de herradura y se forma un núcleo de agua

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

superficial relativamente cálido. Este núcleo tiene temperaturas 2-3 °C mayor que las de las aguas costeras, las cuales se enfrían de manera persistente durante esta estación de una temperatura de 30 °C en octubre una de 17 °C en diciembre. Esto significa una tasa de enfriamiento de casi 4 °C por mes, que es una pérdida significativa de calor. Calor que el océano le cede a la atmósfera en este corto lapso. En 1999, año de La Niña, estos rasgos térmicos de superficie se presentaron desde el mes de octubre, es decir, el proceso de enfriamiento se adelantó un mes.

Es evidente que la persistente configuración de núcleos 'fríos' en verano y núcleos 'calientes' en el invierno, en el AG, se pueden explicar con la formación, evolución y decaimiento de giros ciclónicos en verano y de giros anticiclónicos en invierno, respectivamente (Lavin *et al*, 1997).

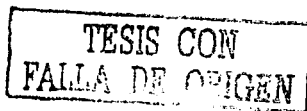
### Región Islas

En la Región de las islas Ángel de la Guarda y Tiburón (figura 5.1-b) se registran los valores de temperatura superficial más bajos de todo el GC.

La distribución espacial de la TSM durante el invierno exhibe valores de 11 °C a 19 °C. Agua superficial con tales temperaturas rodean a las islas en el mes de enero. Para los meses de febrero y marzo las temperaturas mínimas se trasladan hacia el sur, entre las latitudes de 27.5 °N y 29.5 °N, del lado suroeste de las islas, más cerca de las costas de la península. En 1998, año final de El Niño 1997-1998, las temperaturas mínimas registradas sólo fueron de 18 °C, casi 7 °C más calientes que las mínimas registradas en los otros años del periodo 1996-2001.

En el periodo de transición de primavera (frío a cálido), la distribución de la TSM muestra sus temperaturas más bajas en el lado suroeste de las islas y en la costa peninsular, con temperaturas entre 17 °C y 20 °C, en el mes de abril. La TSM aumenta hasta los 23 °C en el mes junio. A lo largo de las costas de Sonora se observan temperaturas más cálidas; hasta de 25 °C en junio, al norte de Isla Tiburón y de 27 °C al sur de esta misma isla.

En verano, la distribución de la TSM sigue conservando la misma estructura: temperaturas bajas del lado peninsular pero de tan solo 1 °C a 2 °C de diferencia respecto a las de la TSM a lo largo de las costas continentales. Así, en julio la TSM es de 27 °C en las costas de la península y de 29 °C en las de Sonora. Sin embargo, en agosto y septiembre la temperatura superficial llega a 31 °C al sur de Isla Tiburón, lo que significa una diferencia de hasta 4 °C entre las costas peninsulares y continentales de esta región. Evidentemente, durante el verano el área cubierta por las aguas más frías de esta región (<15 °C) disminuye drásticamente. Manchas reducidas de agua fría aparecen sólo en la parte suroeste de la Isla Ángel de la Guarda y ninguna alrededor de Isla Tiburón.



En el periodo de transición de otoño las temperaturas más bajas se presentan en octubre, al sur de Ángel de la Guarda. Se nota que en noviembre y diciembre la TSM disminuye alrededor de Isla Tiburón y a lo largo de las costas de Sonora, con temperaturas de hasta 20 °C. Estas aguas frías aparentan un avance costero hacia el norte y hacia el sur y muestran una estructura de 'filamentos' de agua fría.

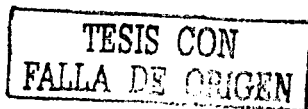
### Región Central

Durante el invierno se observan, en esta región (figura 5.1-c), filamentos de agua fría paralelos a las costas peninsulares y continentales del GC. El de mayor longitud se localiza del lado continental y se prolonga hasta la Región de la Boca; y en algunos años, llega a la entrada misma del GC. En el lado peninsular se observan filamentos de agua relativamente fría que alcanzan latitudes de hasta los 27 °N, frente a Bahía Concepción. Los filamentos observados tienen temperaturas que fluctúan entre 17 °C y 19 °C, lo cual indica la posible existencia de una corriente de agua fría que avanza de norte a sur, hasta llegar a mezclarse, en la superficie, con aguas de temperaturas mayores, como las de 21 °C que se encuentran en la Región Boca del GC.

En el periodo de transición de primavera se observa un calentamiento de sur a norte. Los filamentos de agua fría se desvanecen rápidamente y ya durante mayo y junio el avance de aguas cálidas en la superficie se hace evidente en las costas del lado continental, hasta llegar a Isla Tiburón, donde se realiza la mezcla con aguas frías. La TSM parece distribuirse paralela a las costas, siendo más fría del lado peninsular. Esta característica se observa con mayor claridad en los años de 1996, 1997, 2000 y 2001. En estos años se registraron temperaturas en un rango de 17 °C a 19 °C en abril y de 19 °C a 23 °C en mayo. En el mes de junio las temperaturas observadas fueron más homogéneas, en un intervalo de sólo 24 °C a 27 °C. Estas características son similares en todos los años a excepción de 1999 en el que durante los meses de abril y mayo las temperaturas sólo cubrieron un intervalo de 15 °C a 17 °C.

En los meses cálidos (julio, agosto y septiembre) la TSM tiende a la homogeneidad. Tan solo varía entre 29 °C y 31 °C en toda esta región. Sin embargo se hacen notorios algunos núcleos de agua superficial relativamente cálidos en la parte central de esta región, entre las latitudes 25° N a 28° N, con temperaturas de hasta 31 °C.

En la transición de otoño se observa el enfriamiento de la TSM a lo largo de las costas continentales, en la que aparecen filamentos de agua fría que por alineamiento y conformación sugieren un avance de norte a sur. La TSM, que en octubre supera los 27 °C, disminuye en el mes de noviembre de 23 °C hasta de 19 °C, es decir un enfriamiento de 4 °C/mes. Y en el mes de diciembre decrece la



TSM de 19 °C a 17 °C, con excepción del año 1997 –año de El Niño- cuando las temperaturas de invierno sólo descendieron de 25 °C a 23 °C.

### Región Boca

En el invierno se observa agua fría en la costa continental, con temperaturas de hasta 19 °C. Estas temperaturas son parte de los filamentos de agua fría que se extienden desde la Región Islas del GC (Figura 5.1). Por el lado de la península se observa en todos los años del periodo (1996-2001) la entrada de agua cálida del Océano Pacífico nororiental tropical, con temperaturas mayores a 21 °C. La excepción es el año de 1998, cuando se observó la entrada de agua superficial con una TSM de 23 °C por el lado peninsular y de 21 °C por el lado continental.

Durante la transición de primavera, en el mes de abril específicamente, se observa la misma estructura que en los meses de invierno, pero en los meses de mayo y junio esta situación se invierte claramente. Es decir, se registran valores de la TSM más cálidas del lado continental, con temperaturas de hasta 27 °C, mientras que del lado peninsular sólo alcanzan temperaturas de 25 °C. En 1998 la estructura de la TSM es homogénea en toda el área.

En los meses de verano la TSM tiende a ser marcadamente homogénea, con temperaturas en el estrecho intervalo de 29 °C a 30 °C y carecen de estructuras térmicas notables. No se observan, en estos meses, configuraciones de la TSM que pudieran sugerir desplazamientos geográficos ni evoluciones cinemáticas de las aguas del estrato superficial en esta región.

En la transición de otoño se observa el mismo enfriamiento que en la región central. En las costas del lado continental aparecen filamentos de agua fría, con temperaturas de 17 °C a 21 °C, provenientes de la región de las islas. La mezcla horizontal seguramente contribuye a la disminución de la TSM en esta región: de 29 °C en octubre a 25 °C en noviembre y de 17 °C en diciembre. En contraste, a lo largo de las costas peninsulares la TSM sólo disminuye de 29 °C en octubre a 27 °C en noviembre; y a sólo 24 °C en diciembre.

## MANIFESTACIONES DE EL NIÑO 1997-1998 Y LA NIÑA 1998-2000 EN LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL MAR

El análisis cartográfico realizado permite establecer con claridad la aparición, evolución y disipación de un calentamiento anómalo en el GC durante el último trimestre de 1997 y el primer trimestre de 1998. Este hecho fue particularmente evidente en la región sur. Asimismo, se observó la evolución de un 'periodo frío' en los primeros cinco meses de 1999, con temperaturas de entre

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

13 °C y 22 °C, mientras que el rango de temperatura superficial para los otros años, durante el periodo correspondiente, fue de 14 °C a 26 °C. Estos dos periodos de anomalías térmicas están obviamente relacionados con los desarrollos de El Niño 1997-1998 y La Niña 1999-2000, respectivamente. Las fechas en que ocurrieron tales anomalías climáticas de gran escala se confirman en la siguiente gráfica (Fig. 5.2).

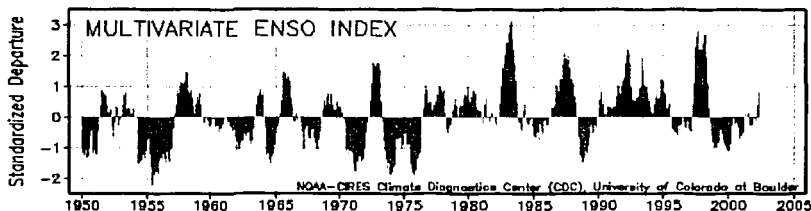


Figura 5.2. Índice Multivariado de El Niño (valor positivo, en rojo) y La Niña (valore negativo, en azul), desde el año de 1950 al año 2002. Nótese que El Niño 1997-98 tiene los valores más altos después de El Niño 1982-83. Tomada del Centro de Diagnóstico Climatológico de la NOAA, en Boulder, Colorado. EUA.

Desde una perspectiva más general, el GC manifiesta cuatro lapsos característicos de la TSM que naturalmente coinciden con las estaciones del año y que se identifican, cada uno, con los rasgos que a continuación se describen (Figura 5.3). El primero, de enero a marzo (invierno) de cada año, se caracteriza por temperaturas superficiales frías, con valores de 14 °C a 22 °C. El segundo periodo se denomina “transición de primavera”, que corresponde a los meses de abril a junio y durante el cual se registran temperaturas en la superficie del mar en un amplio intervalo de 15 °C a 28 °C. El tercer periodo, que corresponde a los meses de julio a septiembre (verano), es el de las aguas superficiales más cálidas del año, con temperaturas entre los 25 °C y 33 °C. Este período se distingue por ser el de la distribución térmica más homogénea. El cuarto y último periodo es el de la “transición de otoño”, que corresponde a los meses de octubre a diciembre, muestra temperaturas que varían de 16 °C a 30 °C y se puede observar que, de los cuatro, es el período con la distribución térmica más heterogénea.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

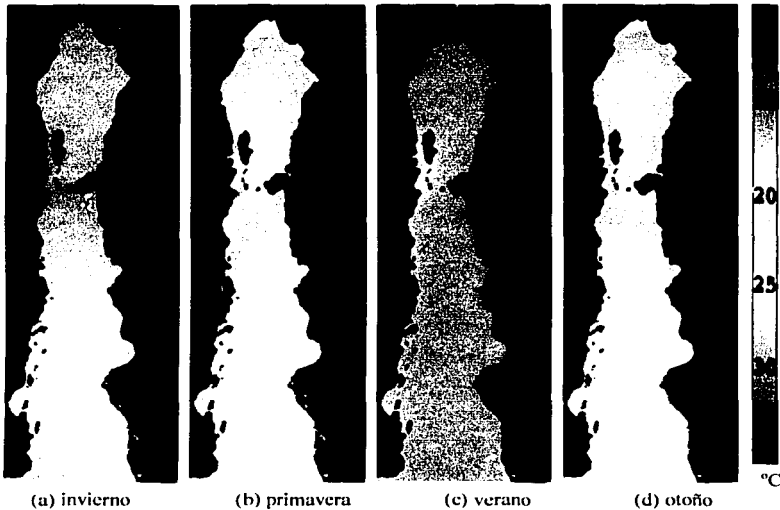


Figura 5.3 Imágenes de TSM por estaciones del año, —medias estacionales— de enero de 1996 a diciembre de 2001.

Se puede observar también en la secuencia de los 72 mapas de medias mensuales de la TSM que las aguas superficiales alcanzan las temperaturas máximas en los meses de agosto y septiembre, para las cuatro regiones, mientras que los valores mínimos se presentan en los meses de enero y febrero, a excepción del año 1998 —año de El Niño 1997-1998—, en el que los mínimos de la TSM se dieron en marzo y abril.

Los meses en el que ocurren las temperaturas máximas y mínimas son los meses en los que es más homogénea la distribución de la TSM en todo el GC; mientras que la mayor heterogeneidad térmica, se presenta en los meses de mayo y noviembre, justo los meses centrales de los periodos de transición (enfriamiento y calentamiento). Las diferencias térmicas llegan a ser de hasta de 8 °C en cada uno de éstos. La Tabla 5.1 muestra de manera resumida los intervalos mensuales de la TSM a lo largo del GC, en cada uno de los meses de los seis años (1996-2001) examinados en este trabajo.

Tabla 5.1. Intervalos de temperaturas en grados centígrados (°C) para cada mes, obtenidas de los mapas de TSM generados a partir de las imágenes AVHRR.

Mes/Año	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Enero	16 – 21	15 – 20	17 – 24	14 – 21	14 – 20	13 – 21
Febrero	15 – 21	14 – 19	18 – 23	13 – 19	15 – 21	14 – 19
Marzo	14 – 22	14 – 20	17 – 22	14 – 21	14 – 21	15 – 19
Abril	15 – 23	16 – 22	16 – 22	14 – 22	15 – 22	15 – 22
Mayo	18 – 26	18 – 26	18 – 25	14 – 22	17 – 26	16 – 25
Junio	23 – 28	23 – 29	21 – 28	19 – 27	22 – 28	22 – 29
Julio	25 – 31	28 – 31	27 – 31	25 – 29	25 – 31	26 – 30
Agosto	28 – 32	29 – 32	27 – 33	27 – 31	28 – 31	28 – 31
Septiembre	27 – 30	29 – 32	27 – 31	27 – 31	27 – 31	28 – 32
Octubre	25 – 29	24 – 30	25 – 29	24 – 30	25 – 29	25 – 30
Noviembre	18 – 25	21 – 28	20 – 27	20 – 27	19 – 24	22 – 27
Diciembre	16 – 22	18 – 26	15 – 23	15 – 22	16 – 22	16 – 25

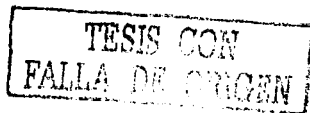
Nota: El análisis cartográfico que aquí se presenta se realizó con base en las impresiones a color y con isólinas de los 72 mapas de medias mensuales de la TSM, cuyas características se especifican en el capítulo anterior (Anexo1). Además, se digitalizaron los 72 mapas y se grabó una animación de éstos en un CD que se anexa al presente trabajo.

## ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

En esta sección se presenta el proceso matemático-estadístico aplicado a las imágenes de la TSM en su formato digital. Este proceso se dedicó a examinar el carácter numérico de la evolución espacio- temporal de la TSM en el GC. El análisis se realizó en dos etapas. En la primera se utilizó la matriz numérica (digital) completa de cada una de las 72 imágenes —promedios mensuales— que componen el acervo de datos en el que se fundamenta este trabajo. En la segunda etapa se eligió un transecto longitudinal del GC a lo largo del cual se analizaron los valores —series de tiempo— de la TSM durante el periodo 1996-2001.

### Análisis de la Matriz de datos

La matriz de datos que da origen a cada una de las imágenes analizadas, además de contener registros (valores numéricos de radiación convertidos a temperatura) —uno por cada pixel— con valores reales de la TSM, contienen también registros que corresponden a pixeles en la parte continental —pixeles nulos— y a otros registros de unidades de área (pixeles) que no estando sobre el continente sino sobre áreas marinas, al momento del paso del satélite sobre esa región se encuentran cubiertas por nubes. Estos últimos se denominan 'pixeles



malos', pues en ellos se registran valores de la TSM que no son reales. Estos números se deben eliminar y sustituir antes de iniciar el análisis matemático-estadístico de la distribución de la TSM en el área de estudio.

En efecto, para la determinación de la estadística básica de la TSM del GC en el periodo 1996-2001 fue necesario eliminar todos los valores irreales de la TSM. La eliminación de tales valores se realizó por la vía de estudiar casuísticamente los intervalos observados de la TSM. Para ello se desplegó el 'histograma de frecuencia' de cada imagen, que indican la frecuencia relativa de las TSM en subintervalos de 0.1 °C, es decir, la fracción de pixeles que registran una TSM que cae dentro de los límites de cada subintervalo. Estos histogramas se obtuvieron, en primera instancia de la correspondiente a la imagen completa del GC y luego se obtuvo un histograma por cada una de las cuatro regiones definidas previamente (Figura 5.1). Cada histograma permite establecer los valores aceptables de la TSM y proporcionan un criterio razonable y a la vez estricto para filtrar los valores de la TSM de los 'pixeles malos'. Estos se sustituyen luego con promedios ponderados linealmente, ya sea en tiempo o en espacio, según se juzgue más apropiado.

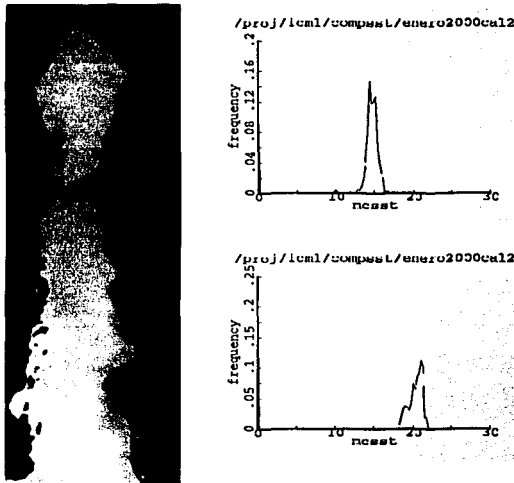


Figura 5.4. Imagen típica de la TSM (enero/2000) acompañada con dos 'histogramas de frecuencia'. Uno que corresponde a las regiones frías (arriba: Alto Golfo e Islas) y el otro a las regiones cálidas de la misma imagen (abajo: Central y Boca).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Con la información contenida en tales histogramas se obtuvo el rango válido de la TSM y los criterios particulares para eliminar los valores malos en cada imagen. De esta manera se generaron nuevas matrices con valores reales y aceptables de la TSM. Además, para cada imagen se calculó su promedio espacial, su desviación estándar y sus valores máximo y mínimos —amplitud del rango de la TSM—, obtenidos éstos útiles estadísticos de los ‘histogramas de frecuencia’ correspondientes (ver anexo 2).

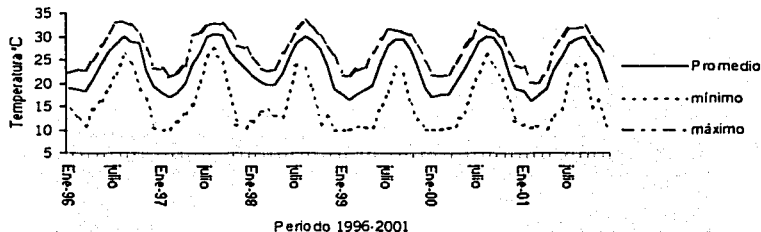


Figura 5.5. Promedio espacial de la TSM del GC y los valores máximos y mínimos registrados en cada uno de los 72 meses —medias mensuales—, de enero de 1996 a diciembre de 2001.

El análisis de la serie de tiempo de los promedios espaciales, en el que cada valor representa la temperatura promedio mensual de todo el GC indica que las temperaturas más bajas ocurren en los meses de febrero y marzo, excepto para el año 2000, en el que la temperatura más baja se presentó en el mes de enero. La temperatura promedio mensual más baja en todo el periodo se registro en febrero de 1999 —al inicio del año de La Niña—, con un valor de 16.53 °C, mientras que en marzo de 1998, año de El Niño, la temperatura sólo descendió hasta 19.78 °C.

Las temperaturas más altas se presentan en el mes de agosto, siendo el más cálido el del año de 1997 —año de El Niño—, con una temperatura superficial de 30.66 °C. El año con el agosto ‘menos caliente’ fue el de 1999 —año de La Niña—, cuando se registro un valor de apenas 29.54 °C.

Se puede observar en forma general que después de que se registra la temperatura máxima en el mes de agosto (Figura 5.5) empieza un descenso de temperatura de 0.25 ° a 2.5 °C/mes durante el mes de septiembre. Luego el cambio se vuelve más drástico pues en los meses de octubre y noviembre o bien entre noviembre y diciembre, descendiende a razón de 5 °C/mes, en promedio. En los meses posteriores la TSM descendiende de 0.2 °C/mes a 1.8 °C/mes, hasta llegar el mes más frío (febrero o marzo), donde se estabiliza momentáneamente (unos días a lo más) e inicia el calentamiento, con características similares al del periodo de

enfriamiento, pero en sentido inverso. Así, al inicio de este proceso las temperaturas aumentan paulatinamente en el primer a una tasa de 0.1 °C/mes a 2.6 °C/mes. Durante la transición de primavera, entre los meses de abril y mayo, el cambio de la TSM se realiza con una rapidez de 3.5 °C/mes. La tasa de cambio de la TSM retorna nuevamente a valores de entre 0.5 °C/mes y 2.6 °C/mes en los meses siguientes y llega a su valor máximo en el mes de agosto.

En 1997, año de El Niño, se registró el cambio menos abrupto en el descenso de temperatura, con una tasa de sólo 3.6 °C/mes en los meses de septiembre y octubre, que no en los meses de octubre y noviembre o noviembre y diciembre, como en todos los otros años de 1996 a 2001. Esto podría definirse como un índice cualitativo-cuantitativo interesante para estimar el impacto térmico en el GC inducido por tales eventos climáticos de gran escala.

En 1999 se registró el cambio más notorio en el ascenso de la TSM en el GC, con una tasa de crecimiento de 5.5 °C/mes (Figura 5.5), que ocurrió en los meses de mayo y junio y no en el periodo de abril y mayo, como en los otros años analizados (1996-2001).

La distribución espacial de la TSM del GC, promedio mensual, con menor desviación estándar ocurre en verano, en agosto y septiembre particularmente; en tanto que la de mayor desviación estándar sucede durante los meses de transición (otoño y primavera). Este hecho se aprecia claramente en la Figura 5.6 y significa que la distribución de la TSM tiende a la homogeneidad en los meses cálidos, mientras que en los meses de transición la distribución de la TSM es más heterogénea. La desviación estándar exhibe valores intermedios para los meses de invierno. Los valores máximos de desviación estándar se presentaron de octubre de 1997 a enero de 1998 y que sugiere una influencia de El Niño 1997-98.

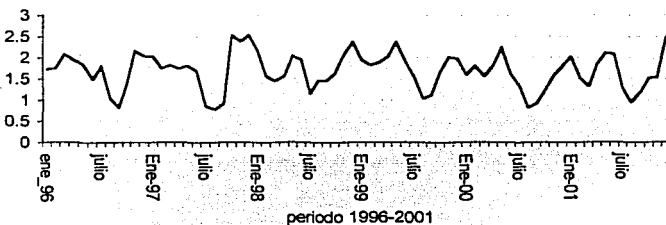


Figura 5.6. Desviación estándar (en °C) de los promedios espaciales de la TSM en el GC, calculada para cada una de las 72 medias mensuales del periodo 1996-2001.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Anomalías de la TSM en el GC

La evolución de la TSM en el GC a escala interanual presenta eventos anómalos, ya sean cálidos o fríos, similares, aunque menores, a los observados en 1997-1998 y 1999-2000. Con el propósito de resaltar tales eventos se calcularon las anomalías de la TSM del GC en dos formas. Primero con respecto a la 'imagen típica', que es la composición de las 72 imágenes mensuales, es decir la matriz de la TSM 'promedio de todo el período', con el fin de obtener las anomalías en escala estacional y anual. Segundo, con respecto a cada 'mes típico', que es la composición por mes de cada uno de los doce meses de los seis años considerados en esta climatología. (Anexo 3).

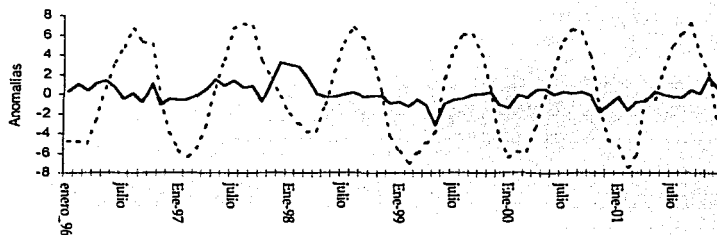


Figura 5.7. Gráfica de las anomalías de la TSM del GC para el periodo 1996-2001, respecto al 'año típico' (línea punteada) y al 'mes típico' (línea continua).

Tal operación produjo 72 imágenes de anomalías respecto a la 'imagen típica' y 72 imágenes respecto al 'mes típico'. A cada una de las imágenes de anomalías —anual y mensual— se le estimaron su media, máxima, mínima y desviación estándar (Anexo 4), como se hiciera con las imágenes compuestas mensuales. Los resultados se muestran en la figura 5.7.

Los datos de las anomalías térmicas de la TSM respecto al 'año típico' muestra con toda claridad que a principios de 1998, año de El Niño 1997-1998, el enfriamiento fue de sólo 3.7 °C, mientras que en los otros años esta diferencia es cercana a los 6 °C. Se observan también dos periodos de máxima diferencia positiva, superior a 6 °C: en agosto de 1997 y en septiembre de 2001. Es necesario aclarar que en el mes de septiembre del 2001 la composición se realizó tan solo con los primeros 5 días del mes, por lo que la anomalía de este mes no es representativa. La máxima diferencia de agosto de 1997 puede atribuirse a la influencia de El Niño 1997-1998.

Los valores de anomalías respecto al 'mes típico' muestran con claridad un calentamiento durante el lapso de noviembre de 1997 a marzo de 1998. En

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

éste se nota que durante el mes de diciembre ocurre la mayor diferencia: 3.17 °C. Esta anomalía es concurrente con El Niño 1997-98.

Asimismo, se observa un enfriamiento anómalo en el periodo de abril a julio de 1999, con un máximo de 3.15 °C en el mes de mayo. Podemos atribuir esta anomalía negativa al desarrollo de La Niña 1999-2000.

En general se observan en la Figura 5.7 dos periodos cálidos bien marcados. Uno a principios de en 1996 y el otro, notoriamente más intenso, entre 1997 y 1998. También se hace notorio el inicio de un calentamiento en el ultimo trimestre del 2001. Son también evidentes en esta misma figura algunos periodos relativamente fríos. Uno de ellos a principios de 1997 y otro más prolongado durante 1999, con una diferencia máxima en el mes de mayo, ya descrita. Se observan también periodos relativamente fríos a principios del año 2000 y durante el otoño del año 2000 y el invierno del año 2001.

### Análisis por zonas

Los registros numéricos de la TSM y los de las anomalías utilizados hasta aquí corresponden al promedio espacial de todo el GC. Pero, como se menciona en el análisis cartográfico, la distribución espacial de la TSM tiene rasgos característicos y distintivos a lo largo del GC. Por lo que al igual que en el análisis cartográfico, se dividió cada matriz en las cuatro regiones (Anexo 5).

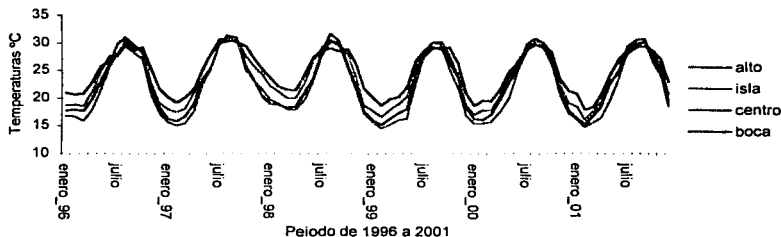


Figura 5.8. Promedios espaciales de la TSM por regiones: Alto Golfo, Islas, Central y Boca.

Esta regionalización se aplicó a cada una de los juegos de 72 imágenes (matrices) y se estimaron para ellas las estadísticas elementales: promedio espacial, máximos, mínimos y desviación estándar. La Figura 5.8 muestra la evolución de la TSM promedio en cada una de las regiones de referencia: Alto Golfo, Islas, Centro y Boca.

Se muestra en la Figura 5.8 que la TSM tiene una evolución similar en las cuatro zonas del GC. Se aprecia en ella un enfriamiento mayor en 1999 y 2001, y un enfriamiento menor en 1998. Las temperaturas más altas se registran en

verano de 1997 en todas las zonas a excepción del Alto Golfo en que las temperaturas más altas se registraron en 1998.

Durante el verano las temperaturas más altas se registran en el Alto Golfo, y en invierno se registran en la región de la Boca. Las temperaturas más bajas se registran en las Islas durante casi todo el periodo, aunque es notable que para los veranos de 1998 y 2001 las temperaturas más bajas se registraron en la Boca.

Es evidente también que existe mayor diferencia de TSM entre cada una de las zonas durante el invierno, mientras que en verano, la TSM asume casi los mismos valores en las cuatro regiones.

La variabilidad de la TSM durante un año es mayor en el Alto Golfo y menor en la Boca, a pesar de que la Boca es conocida como una zona de intercambio de masas de agua y consecuentemente de mezcla intensa.

### Anomalías por Zona

Se estimaron también las anomalías por zonas respecto al 'mes típico' (Figura 5.9). Los resultados son similares a lo obtenido con las anomalías respecto al 'año típico' de todo el GC.

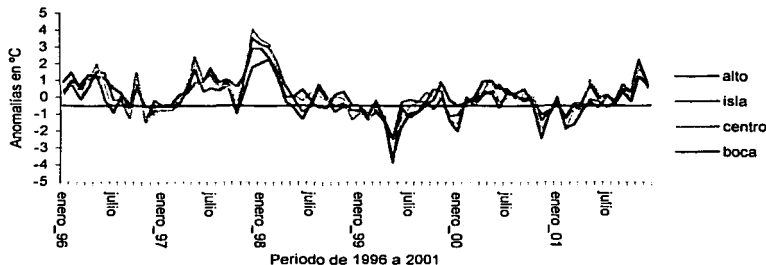


Figura 5.9. Anomalías con respecto al 'mes típico' de cada región de GC: Alto Golfo, Islas, Centro y Boca.

Notablemente las anomalías de la TSM se comportan con similitud en las cuatro zonas. Aunque se puede observar que en los periodos de máximas anomalías positivas, éstas se presentan con mayor intensidad en la zona de las islas y el centro del GC. La anomalía máxima positiva se registró en la región Centro con un valor de 4.05 °C y la mínima en el Alto Golfo, con una diferencia de 3.86 °C.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### Análisis de la TSM a lo largo de un transecto longitudinal del GC

Un método complementario para examinar la estructura espacial y temporal de la TSM en el GC consiste en analizar de cada imagen un mismo transecto longitudinal del GC. Para este trabajo se eligió el transecto cuyos puntos extremos tienen las coordenadas:  $31^{\circ} 36.48' N$ ,  $114^{\circ} 49.10' W$  en el Alto Golfo y  $23^{\circ} 39.56' N$ ,  $108^{\circ} 31.70' W$  en la Boca del GC. El rumbo de éste es de  $36^{\circ} 54.6'$ , hacia el sureste y tiene una longitud de 1080 km. El transecto elegido consiste de 968 píxeles y su ubicación se muestra en la figura 5.10. En esta relación, cada píxel equivale a una distancia de 1.12 km.

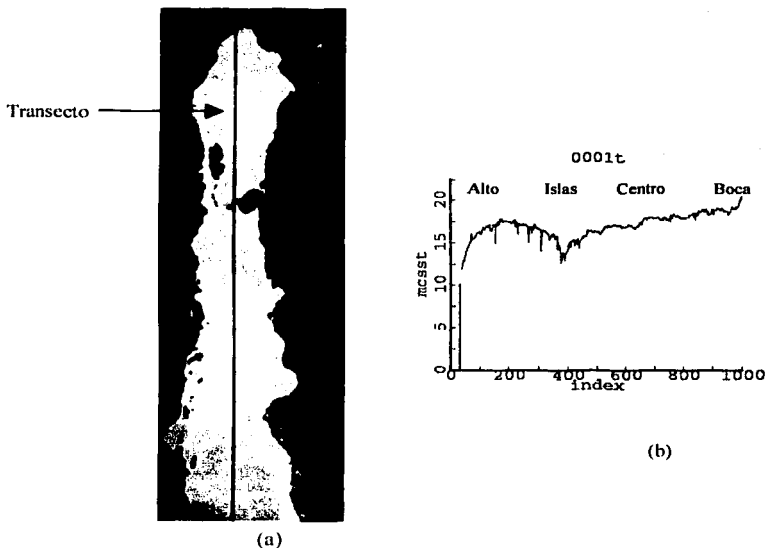


Figura 5.10. Transecto longitudinal del GC, con una longitud total de 1080 Km y 968 píxeles. La imagen (a) es la composición del mes de enero de 2000 y la gráfica (b) es el perfil de la TSM a lo largo del transecto, desde la región del Alto Golfo hasta la Boca.

Con los datos de la TSM del mismo transecto, obtenidos de cada imagen, se generó una matriz 'fuente', denotada por A, cuyas dimensiones son: 968 líneas —número de píxeles—, por 72 columnas —número de meses de 1996 a 2001—, según se muestra en la Figura 5.11.a. Algunos transectos no tenían los 968 datos de TSM y en otros existían valores evidentemente fuera del rango esperado para

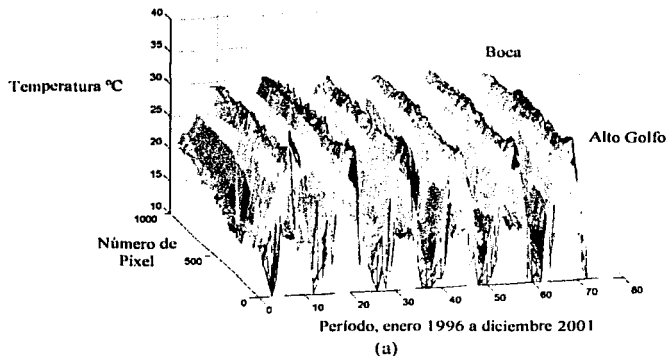
TESIS CON  
FALLA DE REGEN

la TSM, por lo que se realizó una interpolación lineal para llenar los huecos correspondientes a estos valores. Esta interpolación se hizo en forma espacial y temporal, es decir, se interpoló respecto a los valores del mismo transecto y con los transectos vecinos.

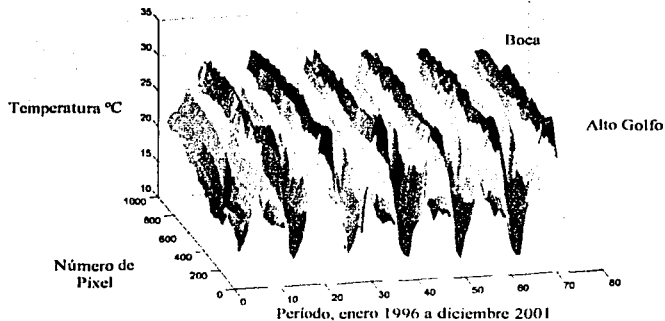
Tabla 5.2 Equivalencia de números de transecto vs fechas, para facilitar la interpretación de las gráficas 55.11 - 5.15

Año/mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
1996	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1997	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1998	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1999	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
2000	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
2001	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72

Una vez conformada la matriz A se le aplicó un promedio móvil de 19 puntos. El promedio móvil se realizó con el propósito de eliminar el evidente e inevitable ruido –valores disparados de la TSM– en este tipo registros. Esto es equivalente a filtrar procesos térmicos de longitudes de onda excesivamente cortas, del orden de 1–3 Km, de las series espaciales de la TSM, y sólo dar una ponderación matemática a aquellos procesos físicos que afectan la distribución de la TSM con escalas de longitud de onda de por lo menos 20 Km. Esta operación matemática eliminó 18 datos en cada serie espacial, nueve en cada extremo del transecto original correspondiente, quedando entonces cada nuevo transecto compuesto por 950 píxeles, cada uno con 72 valores representativos de la TSM promedio mensual. De esta manera se obtuvo la matriz ‘promedio móvil-19’, denotada por B, con 950 líneas y 72 columnas (Figura 5.11.b.). A partir de esta matriz B se realiza el análisis estadístico que a continuación se describe.



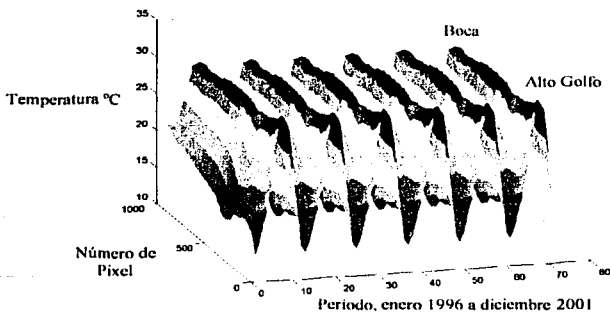
TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



(b)

Figura 5.11. Inciso (a): Visualización de la matriz A de los datos de la TSM del GC 1996-2001. Inciso (b): Visualización de la matriz B de las 'medias móviles' de 19 puntos. Nótese el sutil alisamiento que produce este eficaz como apropiado procedimiento estadístico.

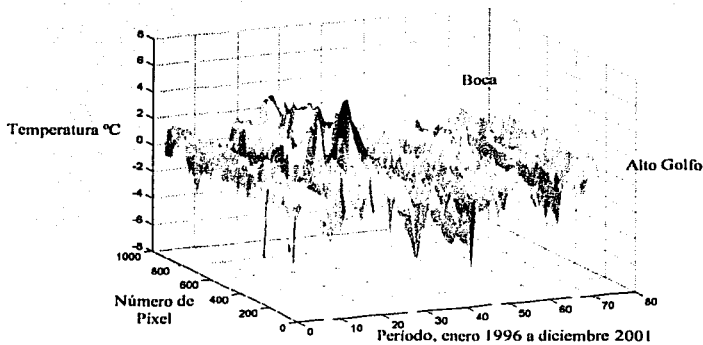
Similar a lo realizado con las imágenes, se obtuvo el 'trayecto mensual típico' de cada mes, es decir, el 'mes promedio'. Así se obtuvo una submatriz de 950 líneas -eje de distancia-, por 12 columnas -eje de tiempo-, que representa el 'año típico'. Con esta submatriz se construyó la matriz  $B_{media}$ , (Figura 5.12.a.) que contiene seis 'años típicos' consecutivos para tener una matriz de la misma dimensión que B. La diferencia entre B y  $B_{media}$ , que se denota  $B_{anom}$ , representa de manera cuantitativa las anomalías de cada mes respecto del 'mes típico' y la diferencia de cada año respecto del 'año típico' (Figura 5.12.b.).



(a)

TESIS CON  
FUNDAMENTO DE ORIGEN



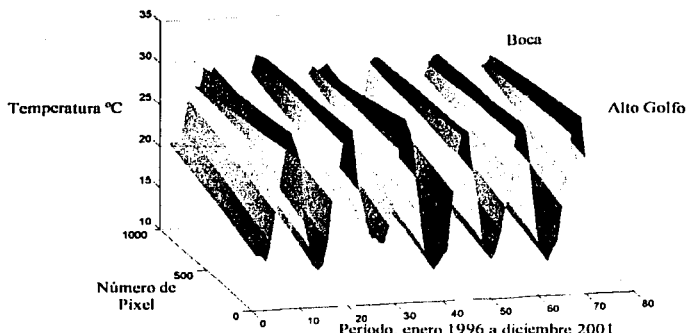


(b)

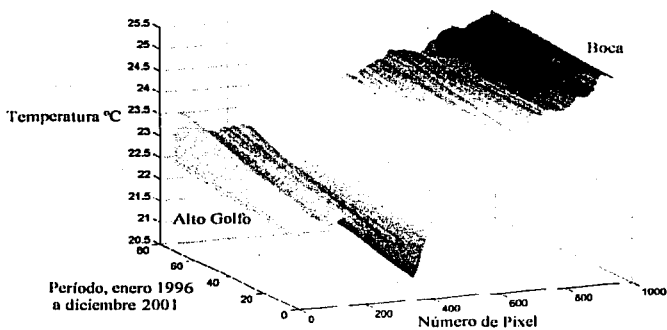
Figura 5.12. Inciso (a): Visualización de la matriz  $B_{med}$  con los 6 'años típicos' consecutivos, cada uno compuesto por los 12 'meses típicos' del periodo 1996-2001. Inciso (b): Visualización de la matriz de anomalías de la TSM con respecto al año típico:  $B_{anom} = B - B_{med}$ . Llama la atención la magnitud de la anomalía térmica durante los meses que corresponden al periodo 1997-1998.

Un análisis visual de la figura 5.12.b destaca de inmediato la notoria anomalía térmica que ocurre en los meses que corresponden al periodo de 1997 - 1998, año en que ocurrió un El Niño intenso. Es evidente que la anomalía es más clara en la mitad sur del GC, particularmente en la región Centro. Asimismo, se nota un lapso claramente frío en los meses intermedios del año 1999, durante el que se inició un evento de La Niña. Sin duda este procedimiento estadístico facilitó la identificación de los efectos de 'El Niño' y 'La Niña' en el GC durante el periodo 1996-2001.

También se linealizó la matriz  $B$ , tanto en el sentido espacial —a lo largo del transecto de cada mes— para generar la matriz  $B_{lin}$ , como en el sentido del tiempo, que es la matriz  $B_{linmpo}$ . La visualización de ambas matrices se exhiben en la figuras 5.13.a y 5.13.b. Las columnas de  $B_{lin}$  son 'rectas' que se ajustaron por el método de 'cuadrados mínimos' a los valores de la TSM a lo largo del transecto, para cada uno de los 72 meses del periodo 1996-2001. La matriz  $B_{linmpo}$  se obtuvo ajustando una recta por ese mismo método de 'cuadrados mínimos' a las 950 series de tiempo, cada una consistente de 72 medias mensuales de la TSM en el GC (Figura 5.13.b).



(a)



(b)

Figura 5.13. Inciso (a): Visualización de la matriz  $B_{lin}$ , que resulta de la linealización sobre el eje espacial. Inciso (b): Visualización de la matriz  $B_{linmpo}$  que resulta de la linealización sobre el eje del tiempo. Se aplicó el método de 'cuadrados mínimos' en ambos casos.

La matriz  $B_{lin}$  claramente destaca la variación anual dominante en la distribución de la TSM del GC. Es clara también la diferencia en la respuesta térmica del Alto Golfo comparada con la de la Boca: más rápida e intensa en el Alto Golfo, según se aprecia en las pendientes de las rectas de ajuste (Figura

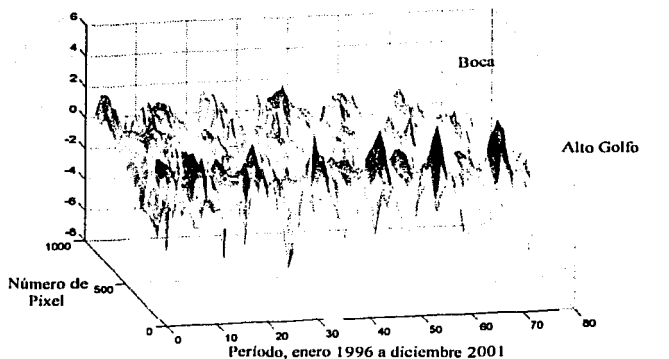
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

5.13.a.). La forma de la matriz  $B_{\text{intmpo}}$  es completamente distinta. La figura 5.13.b. indica el enfriamiento que persiste en la región de las Islas debido a la mezcla vertical intensa inducida por las intensas 'corrientes de marea' en los estrechos pasos geográficos que determinan las islas entre ellas y con las costas de la península y del continente aledañas (Figura 5.1.b.). Es también claro en la figura 5.13.b. que la TSM 'promedio anual' es más cálida en la Boca y en la región Centro.

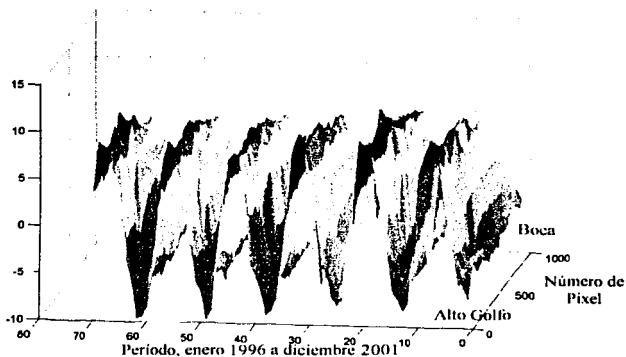
Si a la matriz  $B$  se le resta la matriz  $B_{\text{lin}}$  entonces a cada serie espacial de la TSM se le filtra el valor promedio y la tendencia espacial del mes correspondiente. Lo que queda es la matriz  $B_{\text{fil}}$  (Figura 5.14.a.:  $B_{\text{fil}} = B - B_{\text{lin}}$ ), en la que se puede observar la persistencia de aguas superficiales relativamente frías en la región Islas durante todo el periodo, mientras que en la zona del Alto Golfo se observa el mayor calentamiento en verano y el mayor enfriamiento durante invierno; esto en congruencia con el hecho de que el Alto Golfo tiene una inercia térmica menor que el resto de las regiones del GC (Islas, Centro y Boca), es decir, se calienta y se enfría con mayor rapidez y magnitud en virtud de su menor profundidad y en consecuencia, menor volumen de agua de mar. Llama la atención que la señal anual de la TSM tan evidente en la matriz  $B$ , desaparece casi por completo en la matriz  $B_{\text{fil}}$ . Es decir, la sencilla operación de restar matrices filtra efectivamente la señal anual y facilita la identificación de otros procesos térmicos que ocurrieron en el periodo 1996-2001.

En contraste, la diferencia de las matrices  $B$  y  $B_{\text{intmpo}}$  (figura 5.14.b) no filtra la señal anual sino que la 'normaliza', es decir, hace que las 950 series de tiempo de 72 medias mensuales –una por cada pixel– sean comparables entre sí, puesto que a cada una de ellas se le filtra su media y su tendencia lineal. Queda entonces, según se muestra en esa figura, una secuencia de series de tiempo de la TSM que no tienen (casi) el 'sesgo geográfico'. Esto posibilita la identificación de otros procesos térmicos que suceden en el GC que no son una consecuencia directa del calentamiento-enfriamiento estacional. Por ejemplo, influencia de El Niño y La Niña, vientos locales o eventos extremos de interacción océano-atmósfera.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



(a)



(b)

Figura 5.14. Inciso (a). Visualización de la matriz  $B_{fil} = B - B_{lm}$ ; Desaparece la señal anual y queda solamente la evidencia de la intensa respuesta térmica de la región del Alto Golfo con respecto al resto del GC. Inciso (b): Visualización de la matriz  $B_{filmpo} = B - B_{lmmpo}$ ; la señal del calentamiento-enfriamiento anual de todo el GC se 'normaliza' al restarle la variación espacial. Observe que la amplitud de la variación de la TSM es mayor en el Alto Golfo que en la Boca. Nota: El eje del tiempo esta invertido y debe 'leerse' de derecha a izquierda..

Es claro que la variación más patente e intensa de la TSM en el GC es la 'señal anual' debida al calentamiento (primavera-verano) y enfriamiento (otoño-invierno) de periodo anual asociado a la migración solar anual. Es esta la fluctuación térmica dominante en toda esta cuenca oceánica. El propósito de estos sencillos procedimientos matemáticos es filtrar de una manera razonable y efectiva esta señal dominante y tener la posibilidad de identificar con mayor claridad y examinar con más detalle otros procesos térmicos significativos, aunque sean éstos de menor intensidad y/o de escala distinta.

Estos manejos matriciales simples y otros procedimientos matemáticos, como el del cálculo de 'funciones empíricas ortogonales', que de manera resumida se describen a continuación, son aplicables a la matriz B de medias móviles. El propósito sería el de identificar procesos termodinámicos diversos, de menor intensidad y escala distinta que ocurren en el GC.

### Funciones Empírica Ortogonales

Otra forma de identificar cambios espaciales y temporales que ocurren en las 72 'instantáneas' de la TSM a lo largo del transecto, es a través del cálculo y empleo de las Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's). Este procedimiento matemático del Álgebra Lineal consiste en construir una base ortonormal a partir de los vectores (columnas) de la matriz de datos, de tal manera que se maximicen de manera progresiva las proyecciones de estos vectores a lo largo de la base construida. El procedimiento matemático conduce a la determinación de los valores y vectores propios (eigenvalores y eigenvectores) del sistema de ecuaciones lineales que resulta -la matriz de correlación-; y es tan efectivo que se obtienen en forma ordenada, de mayor a menor ponderación -la varianza-, los vectores linealmente independientes cuya combinación lineal reproduce de manera más sucinta la sucesión de 72 'instantáneas'. Así, los primeros vectores describen la estructura básica y fundamental de la distribución de la TSM en el GC, que se manifiesta a través de la matriz de datos correspondiente.

Las FEO's permiten cuantificar la varianza total de las series de temperaturas en 'modos ortogonales', es decir, independientes entre sí (Soto et al., 1998). Las FEO's las podemos explicar bajo el mismo principio de la transformación de componentes principales, que es una técnica de realce que reduce o remueve la redundancia espectral, o sea, genera un nuevo conjunto de imágenes cuyas bandas presentan información no disponible en otras. Esta transformación se deriva de la matriz de covarianza entre las bandas y crea un nuevo conjunto de imágenes donde cada valor de píxel es una combinación lineal de los valores originales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La primera componente principal —el primer vector—, tiene la mayor varianza y las siguientes componentes, en forma progresiva, tienen menor varianza. Calcular las FEOs de la matriz B produce resultados similares al proceso de la linealización de la misma matriz, pero con respecto al tiempo.

Por ejemplo, se tomó la matriz  $B_{sen}$ , que resulta de restar a cada año del periodo 1996-2001 una senoide con media 23.567 °C y amplitud 5.77 °C, que resulta de tomar el promedio de las 950 series de tiempo de la TSM, y que toma el valor mínimo en febrero y el máximo en agosto. Las primeras siete FEO's de esta matriz se muestran en las graficas (a) y (b) de la figura 5.15.

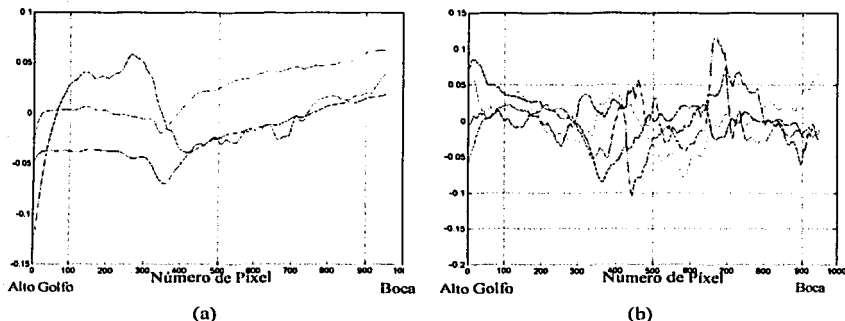


Figura 5.15. Funciones Empíricas Ortogonales de la matriz  $B_{sen}$ . Inciso (a): Las tres primeras FEO's (negro, rojo y azul), que explican 57%, 32% y 6% de la varianza total, respectivamente. Inciso (b): FEO's número 4, 5, 6 y 7 (negro, rojo, azul y verde) que representan el 2.5%, 1%, 1% y 0.5% de la varianza total, respectivamente.

Con las tres primeras FEO's se explica el 98% de la varianza. Esto significa que la estructura fundamental de la matriz  $B_{sen}$  exhibe claramente que el Alto Golfo tiene una respuesta térmica homogénea y que las regiones Centro y Boca tienden a propagar hacia el sur la señal de calentamiento y de enfriamiento a partir de las Islas. La región de las Islas se destaca como una en donde la oscilación de la TSM se ve reducida por otros efectos, principalmente el de la mezcla vertical intensa que provocan las corrientes persistentes que induce la marea en el GC.

Estos métodos de análisis para el estudio de procesos oceanográficos más especializados son temas que quedan fuera del alcance de la presente tesis, enfocada sólo en la descripción de lo que ocurre con la distribución espacio-temporal de la TSM en el GC. En trabajos posteriores se abordarán algunos de los problemas que aquí sólo se mencionan como posibles líneas de investigación tanto cartográfica como oceanográfica.

CAPITULO VI

***Recuento de resultados principales y conclusiones.***

Los registros numéricos de la distribución de la TSM del GC obtenidos de las imágenes de los satélites NOAA/AVHRR, permiten elaborar una descripción cualitativa (conceptual) y cuantitativa (numérica) razonablemente detallada de su evolución. Esta fue posible por la aceptable resolución espacial de los datos (1.5 km<sup>2</sup>) y la frecuencia de muestreo (24 hrs) y gracias también a que las imágenes satelitales se pueden procesar en su forma numérica, como matrices de datos o de mapas, ya sea en papel (impresiones) o en su despliegue digital (imagen en pantalla).

El análisis espacio-temporal de la TSM en el Golfo de California del período de enero de 1996 a diciembre de 2001, permitió conocer los siguientes resultados:

**Variabilidad temporal**

La evolución de la TSM es predominantemente de periodo anual. Los mínimos de la TSM en todo el GC suceden en los meses de invierno (enero, febrero y marzo) y temperaturas máximas en verano, particularmente en agosto y septiembre.

Durante el periodo 1996-2001 se observaron eventos anómalos interanuales destacables: un evento cálido a fines de 1997 y principios de 1998 con valores sobre la media mensual correspondiente (mes típico) de hasta 3 °C; y un evento frío en 1999 con diferencias respecto a la media mensual de casi 2.5 °C. Estos eventos se atribuyen a los fenómenos de El Niño y La Niña de 1997-1998 y 1999, respectivamente.

Las temperaturas de la superficie del mar en el GC en los meses de verano del año 1997 -julio agosto y septiembre-, durante el evento cálido, aunque superiores al promedio mensual, sólo en julio es más notorio con 1.4 C°, mientras que en agosto y septiembre tan sólo es de 0.64 °C y 0.82 °C, respectivamente. Donde sí se hace evidente esta anomalía positiva, es en los meses de otoño invierno, cuando la TSM no descendió hasta los valores promedios. Durante este lapso las diferencias superaron los 3 °C.

Análogamente, el periodo las anomalías frías (1999-2000) se hace más evidente no en los meses de invierno, cuando la diferencia mayor respecto al



promedio mensual fue en enero, con  $0.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sino en los meses de primavera-verano, cuando el calentamiento fue considerablemente menor, particularmente en mayo, con una diferencia de  $3.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  por de bajo del promedio mensual (mes típico) correspondiente.

### Variabilidad Espacial

Como se puede observar en las graficas por zona, la evolución temporal de la TSM es similar en todo el GC. Sin embargo, la estructura espacial de la TSM es diferente, razón por lo que se dividió al GC en cuatro regiones denominadas, de norte a sur: Alto Golfo, Islas, Centro y Boca.

En el Alto Golfo se observo una configuración de núcleos 'fríos' en verano y núcleos 'calientes' en invierno. En esta región, durante el verano, se encuentran las temperaturas más cálidas de todo el GC. Asimismo, durante los meses de invierno, la TSM desciende drásticamente, haciendo de esta región tan fría como la región de las Islas. Estos hechos identifican al Alto Golfo como la región de respuesta más heterogénea de toda la cuenca del GC, esto debido principalmente a que la profundidad media en esta región es menor respecto a todo el GC.

En la región de las Islas la TSM promedio anual es la menor respecto a las demás regiones, aunque en algunos meses de invierno no es tan fría como en el Alto Golfo. De febrero a octubre normalmente se observan las temperaturas más bajas del lado peninsular y alrededor de la isla Ángel de la Guarda; en los meses restantes las temperaturas bajas se registran del lado continental y al sur de Isla Tiburón.

En la región Centro se observa que durante los meses de invierno las TSM mínimas ocurren en el lado continental; esta situación se invierte en los meses de mayo a julio, cuando las temperaturas mínimas de esta región se encuentran en el lado peninsular. Esto puede explicarse por efectos del régimen local de vientos: soplan del noroeste durante el invierno, hecho que estimula la mezcla vertical en el estrato superficial del mar, más intensa en tanto más cerca de la costa continental. De manera análoga, los vientos soplan del sureste durante el verano (Lavin et al. 1997) y consecuentemente inducen un proceso similar en las aguas superficiales, pero ahora más fuerte en las aguas costeras del lado peninsular. En meses de agosto y septiembre se observa la presencia de un remolino con un núcleo de agua caliente en centro de esta región. El núcleo se hace más visible durante los meses cálidos, siendo más evidente durante los meses anómalos de 1997-1998, como se observa en la grafica de anomalías de los transectos (Figura 5.12b.).

En la región de la Boca la distribución de la TSM es similar a la región central, descrita en el párrafo anterior. Se podría identificar y fundir a estas dos regiones en una y denominarla Región Sur del GC, pero durante los meses fríos y de transición, la TSM tiene valores en la Boca que son claramente mayores que la región Centro, con diferencias de hasta  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es en verano cuando la TSM toma los mismos valores en ambas regiones, con la diferencia que en la región Centro se

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



observan remolinos con núcleos cálidos. Además se observa que la evolución de la TSM en el sur del GC aparece normalmente como un avance o desplazamiento de las isolíneas de la TSM de la Boca hacia el Centro.

## CONCLUSIONES

Intercalar, por así decirlo, el despliegue cartográfico y numérico proporcionan una mayor certidumbre a la indagación de los cambios en la distribución de la TSM en el GC. El despliegue cartográfico ayuda en gran medida al análisis visual y espacial y el despliegue numérico es indispensable para el análisis temporal, es decir, el de la evolución de la TSM. Además, el despliegue cartográfico en forma de animación o película permite observar e inferir ciertos aspectos que difícilmente se percibirían en el despliegue estático de las imágenes en papel.

La climatología de la TSM en el GC, para el periodo analizado (1996-2001) evidenció dos eventos anómalos en la escala interanual asociados a los fenómenos de El Niño 1997-1998 y La Niña 1999, respectivamente. Estos fenómenos se evidenciaron en las tres formas analizadas: en el despliegue cartográfico, en los promedios espaciales de las imágenes, de todo el GC y por región, y en los transectos longitudinales del GC. Espacialmente, estos eventos se registran con mayor magnitud en la región Centro, como lo demuestra la grafica de anomalías calculada a partir de la matriz  $B - B_{media}$ , generada por los transectos (Figura 5.11).

Por regiones, existe un mayor calentamiento en el Alto Golfo durante el verano y en la región de la Boca en el invierno. Así mismo se destaca que en la región de las Islas se localizan las TSM más frías de todo el GC, durante todo el año a excepción de algunos meses durante el período analizado en los que las TSM mas bajas se registraron en el Alto Golfo, específicamente en la desembocadura del Río Colorado.

## Perspectivas

Seis años de registros diarios de la TSM del GC, integrados en forma de composiciones mensuales, son insuficientes para consolidar una 'climatología robusta' de esta región oceánica. Esto conduce a establecer la necesidad de aumentar el acervo de datos de la TSM y, a la vuelta de por lo menos otros 6 años, realizar un estudio similar para obtener estadísticos climatológicos más estables. Hay quienes sostienen que una 'climatología' de este tipo requiere de por lo menos 30 años de datos para determinar los promedios y valores de referencia con mayor precisión.

La presente Tesis es pues un primer esfuerzo en esta línea de investigación climática y sus resultados apuntan en la dirección correcta y adelantan valores numéricos de referencia que mucho servirán a estudios futuros.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Por otro lado, el examen y análisis de datos realizado para la elaboración del presente trabajo se hizo con un propósito principalmente cartográfico y descriptivo. Con estos mismo datos se puede extender y profundizar un análisis que permita la identificación y el estudio de procesos oceanográficos (físicos y termodinámicos) de mayor envergadura y complejidad. Tales estudios están en desarrollo y serán motivo de trabajos a publicar en un futuro cercano.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Gómez, R, (2002) *Los Mares Mexicanos a Través de la Percepción Remota*. Temas selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía, UNAM, pp 45-50.
- Argote, M.L., M.F. Lavín, A. Amador and J.R. Hunter (1995), "*Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California*", Journal of Geophysical Research, 100, 16, 103-16,118
- Bello Pineda, J., (1998), "*Sistema de Clasificación para los tipos de fondo del arrecife alacranes compatible con una imagen landsat TM*", Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la especialidad de Biología Marina, Centro de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, pp 5-7.
- Bray, N.A. (1988), "*Thermohaline circulation in the Gulf of California*" Journal of Geophysical Research, 93, pp. 9223-5020.
- Campos J.(1999), "*Cartografía Moderna*". Apuntes de Diplomado en Geomática, Centro de Investigación en Geografía y Geomática 'Jorge L. Tamayo A.C. SEP-CONACyT.
- Fernández, A., A. Gallegos y J. Zavala (1993), "*Oceanografía física de México*", Ciencia y Desarrollo, vol. XVIII, núm. 108, pp. 24-35.
- Gallegos, A., J. Barberán, S. Czitrom, A. Fernández y R. Rodríguez (1996), "*Oceanografía Satelital en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM*", GeoUNAM, Vol. 3, núm. 2, pp. 3-8.
- Gómez, G. y R. Bonifaz (1996), "*Una nueva estación receptora de imágenes en el instituto de Geografía de la UNAM* ", GeoUNAM, Vol. 3, núm. 2, pp. 29-32.
- Lavín, M.F., E. Beier y A. Badan (1997) "*Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: escalas estacional e interanual*", en M.F. Lavín, editor, Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Monografía No.3, Unión Geofísica Mexicana, pp. 141-171.
- López A. (1999), "*Principios de cartografía*" Apuntes de Diplomado en Geomática, Centro de investigación en Geografía y Geomática 'Jorge L. Tamayo A.C. SEP-CONACyT.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Maling, D.H.(1989), *Measurements from maps, principles and methods of cartometry*. Formerly University of Wales, Pergamon press, 577 pp.

Marinone, S.G. y Lavin, M.F., (1997), "*Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California*", en M.F. Lavin, editor, Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Monografía No.3, Unión Geofísica Mexicana, pp. 113-139.

Monaldo, Frank (1996), *Primer on the estimation of sea surface temperature using TeraScan processing of NOAA AVHRR satellite data*. Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University.  
[http://fermi.jhuapl.edu/avhrr/primer/primer\\_html.html](http://fermi.jhuapl.edu/avhrr/primer/primer_html.html)

Raisz, E. (1985) *Carografía*. Barcelona. Ediciones Omega, séptima edición, pp. 60-61.

Reyes C., (1999) *Sistemas de información geográfica y análisis espacial*. Apuntes de Diplomado en Geomática, Centro de investigación en Geografía y Geomática 'Jorge L. Tamayo A.C. SEP-CONACyT.

Ripa, P. Y G. Velásquez, (1993), "*Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California*", Geofísica Internacional, 32, pp. 41-56.

Robinson, A.H. (1987), *Elementos de Cartografía*. Barcelona, Ediciones Omega, pp.4-17.

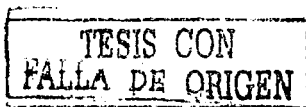
Robles, J.M. and S.G. Marinone, 1987. "*Seasonal and interannual thermohaline variability on the Guaymas Basin in the Gulf of California*", Continental Shelf Research, 7, pp. 715-733.

Roden, G.I. (1958). "*Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California*", Pacific Science, 12, pp. 21-45.

Roden, G.I and G.W. Groves (1959), "*Recent oceanographic investigations in the Gulf of California*", Journal of Marine Research, 18, pp. 10-35.

Soto-Mardones, L., S.G. Marinone y A.Pares-Sierra (1999), "*Variabilidad Espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California*", Ciencias Marinas, Vol. 25. núm. 1, pp. 1-30.

**SPRING: Tutorial de Geoprocesamiento (2001)**. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Brasil, INPE. <http://www.dpi.inpe.br/spring/epanhol.manuales.htm>



**TeraScan 2.6 (1995), Reference Manual**, SaeSpace Corporation, 932 pp.

Sverdrup, H.U., 1941. "*The Gulf of California: Preliminary discussion of the cruise of the "E.W. Scripps" in February and March, 1939*". Proc. 6<sup>th</sup> Pacific Science Congr., 3, pp. 161-166.

Tikunov, V.S. (1996), "*La revolución de la información en geografía*", Revista Internacional de ciencias Sociales.

<http://www.UNESCO.org/issj/rics150/tit150.htm>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ***ANEXOS***

### **ANEXO 1** Disco compacto en el que se incluyen:

Imágenes de composición mensual de la Temperatura de la Superficie del Mar en el Golfo de California, con isotermas a cada 2 °C.

Animación de las composiciones mensuales con la gráfica de promedios espaciales del la TSM del GC.

Imágenes típicas: composición de las 72 imágenes mensuales de TSM y composición mensual de la TSM para el periodo de estudio.

Animación de las imágenes de anomalías respecto a la 'imagen típica'.

Animación de las imágenes de anomalías respecto a la 'imagen típica mensual'.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANEXO 2 Datos estadísticos de la matriz de datos de cada imagen

Mes	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Enero_96	18.83	14.3	22.2	1.7223
Febrero	18.7759	12.3	23.05	1.74348
Marzo	18.4725	10.7	23	2.07944
Abril	20.802	14.4	25	1.9363
Mayo	24.0753	16.1	28.075	1.84943
Junio	26.7278	19.2	30.8	1.49214
Julio	28.2528	21.85	33.3	1.81327
Agosto	30.081	26.2	33.52	1.05285
Septiembre	28.8014	24	32.65	0.810263
Octubre	28.5478	18.5	30.533	1.36708
Noviembre	22.9106	16.4	27.4	2.1572
Diciembre	19.56	10.8	23.6	2.0355
Enero-97	17.8877	10.1	23.0667	2.01412
Febrero	17.204	10.1	21.25	1.74457
Marzo	17.974	11.8	22.4	1.82344
Abril	20.2251	13.5	23.675	1.73076
Mayo	24.1834	15.3	30.375	1.81001
Junio	26.9457	20.35	31.15	1.67725
Julio	30.189	25.85	32.5	0.861032
Agosto	30.6671	27.5	33.3	0.773743
Septiembre	30.4285	24.5	32.8	0.920847
Octubre	26.8228	17.35	30.95	2.52154
Noviembre	25.1412	11.4	28.425	2.38183
Diciembre	23.2931	10.5	27.65	2.52814
Enero_98	21.5387	11.6	25.175	2.16031
Febrero	20.5834	14.23	23.475	1.55984
Marzo	19.7881	14.3	23	1.44274
Abril	19.8015	13.2	23.3	1.56417
Mayo	22.4037	12.95	26.55	2.03485
Junio	25.7603	18.2	29.075	1.94472
Julio	28.7141	24	31.7	1.14367
Agosto	30.1508	23.333	33.35	1.46175
Septiembre	29.3124	18.7	32	1.45733
Octubre	27.3498	11.2	30.0667	1.63177
Noviembre	23.839	13	27.8	2.0632
Diciembre	19.0731	10.1	26	2.37239

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## ANEXO 2 continuación

Mes	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Enero_99	17.7079	10.3	22.075	1.93979
Febrero	16.5344	10.3	21.6667	1.81932
Marzo	17.602	10.8	22.75	1.88082
Abril	18.5501	10.9	23.5	2.02842
Mayo	19.5669	10.4	26.5	2.36544
Junio	25.0992	15.2667	29.6	1.92013
Julio	28.1962	18.35	32.1	1.53909
Agosto	29.5406	23.4333	31.6	1.02795
Septiembre	29.5221	21.8333	31.4	1.11106
Octubre	27.5492	15.55	30.55	1.67544
Noviembre	24.1615	12.3	28.05	2.01247
Diciembre	18.8459	10.1	24.5	1.96895
Enero_00	17.0457	10.1	21.8333	1.5828
Febrero	17.5883	10.1	21.675	1.79897
Marzo	17.7625	10.6	22.0667	1.55517
Abril	20.1417	10.8	24.4667	1.80503
Mayo	23.2145	13.8	27.95	2.2421
Junio	26.0424	19.0333	29.65	1.61143
Julio	29.0159	22.4	33	1.3248
Agosto	30.0871	26.1	32.375	0.817849
Septiembre	29.7836	23.425	31.45	0.909892
Octubre	27.4238	20.85	29.9	1.22533
Noviembre	22.1957	16.333	26.4	1.57039
Diciembre	19.008	12.25	24.075	1.79434
Enero_01	18.2604	11.4333	23.6	2.02327
Febrero	16.1296	10.4	20.4667	1.5146
Marzo	17.2935	11.2	20.3	1.31325
Abril	18.9549	10.2	22.8	1.83012
Mayo	22.9526	12.9333	27.65	2.09807
Junio	26.0231	14.5	30.25	2.08251
Julio	28.5309	21.85	32.1	1.27571
Agosto	29.6668	23.825	32.1	0.943587
Septiembre	30.2656	24	32.3	1.18236
Octubre	27.6536	23.35	29.15	0.89361
Noviembre	25.7	16.1	28.075	1.5361
Diciembre	20.5952	10.1	25.675	2.473

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



**ANEXO 3 Datos Estadísticos de la 'imagen típica' y de las imágenes de los 'meses típicos'.**

**Datos de imagen típica**  
(Promedio espacial de todo el período)

<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desviación Estándar</b>
23.5046	16.7153	25.4606	1.26517

**Datos de los meses típicos**

<b>Mes</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desviación Estándar</b>
Enero	18.4242	10.1	22.4861	1.97404
Febrero	17.7299	10.2	21.5861	1.69008
Marzo	18.0913	10.275	21.3931	1.6736
Abril	19.6917	11.7042	23.3708	1.7829
Mayo	22.722	14.2125	27.085	1.88943
Junio	26.0939	19.2222	28.6972	1.5742
Julio	28.7968	23.3067	31.5972	0.904825
Agosto	30.0266	26.8111	32.1972	0.761433
Septiembre	29.6034	25.2139	31.2944	0.787301
Octubre	27.5293	15.06	29.395	1.28184
Noviembre	23.882	11.3	27.0986	1.98483
Diciembre	19.9644	10.1	24.5944	2.14432

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANEXO 4 Datos de anomalías respecto a una 'imagen típica' y 'meses típicos'

Valores del promedio espacial de las imágenes de anomalías respecto a la 'imagen típica'.

Mes	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Enero	-4.76936	-5.66899	-2.06803	-5.87123	-6.50374	-5.30989
Febrero	-4.79839	-6.32514	-3.01754	-7.04113	-5.93936	-7.44397
Marzo	-5.07932	-5.5651	-3.79787	-5.94939	-5.77157	-6.23332
Abril	-2.74592	-3.30731	-3.78869	-4.96867	-3.38284	-0.456649
Mayo	0.556147	0.665266	-1.11791	-3.95052	-0.303546	-0.5666
Junio	3.20957	3.42912	2.25324	1.59166	2.5368	2.50998
Julio	4.73657	6.67021	5.21975	4.69724	5.5074	5.02407
Agosto	6.57048	7.15359	6.64629	6.03653	6.5758	6.16205
Septiembre	5.28918	6.91825	5.80391	6.01743	6.27709	7.15619
Octubre	5.02788	3.261	3.8348	4.03432	3.87712	4.09752
Noviembre	-0.693407	1.61327	0.295669	0.608761	-1.38907	2.18195
Diciembre	-4.00247	-0.296829	-4.47223	-4.62738	-4.56159	-2.93805

Valores del promedio espacial de las imágenes de anomalías respecto a 'mes típico'

Mes	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Enero	0.287774	-0.620552	2.962	-0.829221	-1.45126	-0.261758
Febrero	1.00553	-0.54185	2.73589	-1.27825	-0.161495	-1.67622
Marzo	0.333803	-0.154507	1.60755	-0.536819	-0.357259	-0.819064
Abril	1.06164	0.5083	0.005795	-1.1547	0.429256	-0.752098
Mayo	1.34464	1.45435	-0.328906	-3.15954	0.484047	0.222244
Junio	0.624045	0.846464	-0.335468	-0.996377	-0.0524724	-0.074065
Julio	-0.520555	1.39415	-0.0907621	-0.599749	0.214307	-0.268705
Agosto	0.0526229	0.630938	0.128759	-0.4796666	0.0611262	-0.354505
Septiembre	-0.805705	0.82818	-0.290882	-0.0780488	0.182298	0.41803
Octubre	0.99949	-0.779224	-0.193176	0.006397	-0.156165	0.0412502
Noviembre	-1.14139	1.2178	-0.11701	0.186749	-1.83129	1.75222
Diciembre	-0.496791	3.17929	-0.968673	-1.11146	-1.08548	0.575369

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXO 5 Promedios espaciales por región para el periodo de enero de 1996 a diciembre de 2001.**

mes	alto	isla	centro	boca
Enero_96	17.6504	16.7465	18.6997	20.9051
Febrero	17.840	16.5657	18.7673	20.581
Marzo	17.4821	15.7585	18.3949	20.6915
Abril	19.6801	17.7506	21.1517	22.7593
Mayo	22.9796	21.2976	24.6899	25.5447
Junio	26.1574	25.4822	27.5679	26.6912
Julio	29.6827	28.0717	27.962	27.7223
Agosto	30.9822	29.3802	30.2593	29.5901
Septiembre	29.4798	28.1731	28.85333	28.5898
Octubre	28.1691	27.0118	29.0383	29.155
Noviembre	21.2372	20.4767	22.7409	25.2329
Diciembre	18.2593	17.1987	19.0299	21.553
Enero_97	16.2386	15.608	17.9582	20.1326
Febrero	15.8047	15.0087	17.4139	19.1834
Marzo	16.7194	15.4414	18.0801	20.0807
Abril	19.0001	17.6123	20.88	21.6531
Mayo	23.382	22.1891	24.7639	25.1252
Junio	25.3385	25.0651	27.8919	27.8374
Julio	29.7291	29.6358	30.533	30.3611
Agosto	31.1705	30.1527	30.8214	30.3374
Septiembre	30.8502	30.3444	30.602	30.0232
Octubre	25.7518	25.0453	27.5764	29.3044
Noviembre	23.1912	23.0308	25.6549	27.0606
Diciembre	20.2184	21.476	24.0916	25.0747
Enero_98	18.7911	19.5493	22.0096	23.5518
Febrero	18.6667	18.7941	21.0809	21.965
Marzo	18.2051	17.895	19.9379	21.373
Abril	18.3802	17.8307	19.9746	21.4256
Mayo	21.1049	19.6297	22.8228	24.3362
Junio	23.681	23.1832	26.7049	27.4006
Julio	28.7647	27.7088	29.2516	28.4556
Agosto	31.5466	30.1289	30.37	28.8667
Septiembre	30.1831	29.4227	29.6731	28.3104
Octubre	25.9003	25.4717	27.8289	28.8329
Noviembre	22.1543	21.4342	23.9788	26.143
Diciembre	17.693	17.1722	18.6961	21.716

**TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN**

## ANEXO 5 continuación

mes	alto	isla	centro	boca
<b>Enero_99</b>	15.9207	15.6799	17.6623	20.0591
Febrero	15.1464	14.4344	16.5299	18.5502
Marzo	16.1303	15.1553	17.7332	19.7405
Abril	17.217	15.9417	18.7912	20.0853
Mayo	17.8911	16.1611	20.1791	21.8494
Junio	24.3795	22.3101	25.5113	26.6282
Julio	27.9635	27.2894	28.5092	28.4843
Agosto	29.9329	28.7945	29.9258	29.2116
Septiembre	29.6811	29.1978	30.2043	28.7397
Octubre	26.5897	25.2841	27.8019	29.1744
Noviembre	23.6039	21.7121	23.997	26.1724
Diciembre	18.2821	16.8384	18.6929	20.7821
<b>Enero_00</b>	16.2986	15.3522	16.9985	18.5987
Febrero	16.0551	15.4564	17.8193	19.6078
Marzo	17.013	15.6998	17.7799	19.4339
Abril	19.557	17.5234	20.5175	21.5499
Mayo	22.775	19.9555	23.7636	24.6496
Junio	25.495	24.842	26.6441	26.32
Julio	29.6563	28.4563	28.9755	28.8836
Agosto	30.8209	29.72	30.1334	29.7208
Septiembre	30.0872	29.1819	30.1398	29.4576
Octubre	26.5302	25.9923	27.8237	28.2298
Noviembre	21.6853	20.4044	22.2014	23.3574
Diciembre	17.6293	17.0747	18.9198	21.101
<b>Enero_01</b>	16.2958	16.0098	18.3723	20.6324
Febrero	15.1346	14.642	15.9743	17.7545
Marzo	16.6569	15.528	17.59	18.3352
Abril	18.3132	16.3124	19.2511	20.5621
Mayo	22.4912	19.5292	23.7395	24.1257
Junio	24.9234	23.4435	27.1832	26.6938
Julio	29.2819	28.3223	28.6527	27.9877
Agosto	30.4368	29.4107	29.8019	29.1304
Septiembre	30.601	30.2171	30.2333	29.3099
Octubre	27.0579	26.3095	27.8751	28.4429
Noviembre	24.8953	24.0213	25.873	27.0236
Diciembre	19.3322	18.5356	20.5603	22.9026

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**