



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL GRADIENTE
TÉRMICO OCASIONADA POR EL FENÓMENO CLIMATOLÓGICO
"TEHUANO" UTILIZANDO IMÁGENES DE TEMPERATURA
SUPERFICIAL DEL MAR (1996 - 2013).**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO GEOMÁTICO

P R E S E N T A

GONZÁLEZ TEJADILLA ERICK MAXIMILIANO

DIRECTOR DE TESIS

**DR. FRANCISCO JAVIER FLORES DE
SANTIAGO**



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

*A las personas que más quiero y siempre han estado
brindándome su apoyo y amor incondicional mis padres
Yolanda y Jaime y mi hermano Sebastián.*

RESUMEN

El gradiente térmico en la superficie del mar consiste en la variabilidad de temperatura por unidad de distancia. Dicha variable puede ser estimada por medio de sensores remotos, como es el caso de series temporales y espaciales de imágenes de temperatura superficial del mar (TSM) provenientes de plataformas satelitales.

Específicamente, el gradiente térmico en el Golfo de Tehuantepec, México se origina principalmente por una serie de factores físicos, los cuales incluyen la dirección y velocidad de las corrientes marinas, el ángulo de incidencia solar y los patrones de viento continental y costero.

El objetivo principal de este trabajo consistió en realizar un análisis espacio-temporal de imágenes satelitales de la TSM, para poder determinar el periodo de presencia de los vientos Tehuanos en el Golfo de Tehuantepec.

Se colectaron datos diarios de TSM provenientes de imágenes satelitales (NOAA) en un lapso de tiempo de dieciocho años (1996-2013). Se extrajeron datos puntuales de TSM sobre series de transectos latitudinales y longitudinales para poder determinar el comportamiento espacial y temporal de la TSM en el Golfo de Tehuantepec.

Los resultados muestran una variabilidad mayor de la TSM en los meses de octubre a marzo con una diferencia térmica entre $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ relativa a los valores fuera del Golfo de Tehuantepec, comparados con los meses de abril a septiembre. Estos datos concuerdan con los registros de mayor intensidad del viento continental (Tehuanos) registrados para la zona de estudio en el mes de febrero.

INDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| Índice de Figuras..... | XI |
| 1. Planteamiento del problema..... | 1 |
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.1.1. ¿Qué es la surgencia?..... | 2 |
| 1.1.2. Tipos de surgencia..... | 3 |
| 1.1.2.1. Por Transporte de Eckman..... | 3 |
| 1.1.2.2. Surgencia por vientos continentales..... | 4 |
| 1.1.2.3. Surgencia en el océano abierto..... | 5 |
| 1.1.2.4. Surgencia por diferencias de densidad..... | 5 |
| 1.1.3. Las surgencias en el Golfo de Tehuantepec..... | 6 |
| 1.1.4. ¿Qué es el viento?..... | 6 |
| 1.1.4.1. Vientos en el Golfo de Tehuantepec..... | 7 |
| 1.2. Objetivo..... | 11 |
| 1.3. Hipótesis..... | 11 |
| 1.4. Área de estudio..... | 11 |
| 1.5. Justificación..... | 13 |
| 2. Conceptos..... | 14 |
| 2.1. Percepción Remota..... | 14 |
| 2.2. Sensores..... | 15 |
| 2.2.1. Clasificación de los sensores remotos..... | 15 |
| 2.3. Tipos de resoluciones en un sensor remoto..... | 17 |
| 2.3.1. Resolución espacial..... | 17 |
| 2.3.2. Resolución espectral..... | 18 |
| 2.3.3. Resolución radiométrica..... | 18 |
| 2.3.4. Resolución temporal..... | 18 |
| 2.4. Sensores AVHRR..... | 18 |
| 2.4.1. Especificaciones de los Radiómetros AVHRR..... | 19 |
| 2.4.2. Aplicaciones de datos obtenidos con el sensor AVHRR...20 | |
| 2.5. Satélites NOAA..... | 21 |
| 3. Materiales Y Métodos..... | 22 |
| 3.1. Recolección de imágenes satelitales del sensor..... | 22 |
| 3.2. Obtención de los valores de Temperatura Superficial del Mar..... | 22 |
| 3.3. Georreferenciación de las imágenes..... | 26 |
| 3.4. Diseño de los transectos..... | 27 |
| 3.5. Extracción de los valores de TSM y generación de gráficas para cada transecto..... | 29 |
| 4. Resultados..... | 30 |
| 4.1. Análisis Espacio – Temporal de las gráficas obtenidas..... | 30 |
| 5. Conclusiones y Recomendaciones..... | 42 |
| 5.1. Conclusiones..... | 42 |
| 5.2. Recomendaciones..... | 44 |
| REFERENCIAS..... | 45 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1. Diagrama general de una surgencia..... | 2 |
| 2. Transporte de Ekman..... | 3 |
| 3. Movimientos de aguas subsuperficiales causados por la surgencia..... | 4 |
| 4. Vientos continentales..... | 4 |
| 5. Oceano abierto..... | 5 |
| 6. Diferencia de densidades..... | 5 |
| 7. Medias mensuales de las observaciones de las velocidades del viento en las estaciones de La Venta y Salina Cruz..... | 8 |
| 8. Evolucion térmica del Golfo de Tehuantepec por el viento en enero de 1996..... | 10 |
| 9. Ubicación geográfica del Golfo de Tehuantepec..... | 12 |
| 10. Espectro electromagnético..... | 15 |
| 11. Georreferenciación de las imágenes..... | 26 |
| 12. Transectos de estudio..... | 27 |
| 13. Meses típicos transecto Tehuano..... | 32 |
| 14. Trasecto Tehuano..... | 33 |
| 15. Meses típicos transecto T3..... | 34 |
| 16. Transecto T3..... | 35 |
| 17. Meses típicos transecto P1..... | 36 |
| 18. Transecto P1..... | 37 |
| 19. Meses típicos transecto P2..... | 38 |
| 20. Transecto P2..... | 39 |
| 21. Meses típicos transecto P3..... | 40 |
| 22. Transecto P3..... | 41 |

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

A través del tiempo el hombre ha estado en constante búsqueda de métodos para el monitoreo y predicción de fenómenos naturales con el objetivo de poder prevenir catástrofes y minimizar los daños ocasionados por ellos. Esto es llevado a cabo gracias al estudio de las ciencias de la tierra, entre las cuales se encuentra la climatología.

Al hablar de climatología podemos decir, que está basada en la colecta de datos de algún lugar en específico para estudiar el clima y sus variaciones a lo largo de un periodo de tiempo. Debido a que la climatología y la meteorología usan los mismos parámetros de evaluación tienden a confundirse entre sí; no obstante, la diferencia entre estas dos ciencias radica en que la meteorología (ciencia que estudia el tiempo atmosférico) realiza previsiones a corto plazo o de manera inmediata, mientras que la climatología tiene un enfoque temporal más amplio y a diferencia de la meteorología que busca determinar las condiciones particulares de una fecha, la climatología determina su estadística (media, desviación estándar, valores extremos, etc).

Es necesario mencionar que la importancia de la climatología ha estado en constante crecimiento con el paso del tiempo, debido a que desde un punto de vista económico la estructura del comportamiento del clima en una región puede llegar a contribuir en el desarrollo de las actividades económicas locales. (Cuadrat y Pita, 2004)

Si se habla de climatología tenemos que hablar de qué es el clima, el cuál es el conjunto de fenómenos atmosféricos que caracterizan las condiciones habituales o más probables de una zona determinada de la superficie terrestre.

A lo que llamamos clima es el resultado de:

- La radiación solar
- La atmósfera
- La forma y movimientos de la tierra
- Las características de la superficie terrestre

Por ejemplo, dos de los muchos fenómenos de estudio en el océano y principales causantes de la disminución de la temperatura superficial del mar (TSM) en la zona en la zona costera son la surgencia y el viento.

1.1.1. ¿Qué es la surgencia?

Las surgencias son movimientos de aguas ascendentes mediante los cuales las aguas de niveles profundos son llevadas hasta la superficie, mediante flujo horizontal por esfuerzo del viento, produciéndose así un aporte de nutrientes a las aguas superficiales empobrecidas por el consumo biológico (Figura 1)¹ (http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h72.html).

Si bien el fenómeno puede ocurrir en cualquier parte del océano, sus características más destacadas se presentan a lo largo de los bordes orientales de los océanos (esto es en las costas occidentales de los continentes), como sucede en el noroeste y suroeste de África, California, la costa occidental de México, Perú y Chile. En estas costas las aguas se caracterizan por sus relativamente bajas temperaturas y por su alta producción primaria.



Figura 1. Diagrama general de una surgencia.¹

¹ Imagen tomada de Cordell Bank National Marine Sanctuary - NOAA

1.1.2. Tipos de Surgencia

En el océano se puede distinguir varios tipos de surgencia: oceánica, costera y ecuatorial. Las surgencias son muy importantes puesto que determinan contrastes climáticos y biológicos notables y crean las condiciones para una gran producción biológica. Las surgencias costeras se dividen en cuatro tipos:

1.1.2.1. Por Transporte de Ekman.



Figura 2. Transporte de Ekman²

El efecto Coriolis hace que el agua que ha sido puesta en movimiento por los vientos sea desviada a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur. Sin embargo, debido a la fricción, las capas superficiales se mueven en un ángulo de 45°. Así el cuerpo de agua puede pensarse como un conjunto de varios estratos, cada uno se mueve cada vez más lento por la fricción, en un movimiento en espiral cada vez más hacia la derecha en el Hemisferio Norte hasta que la fricción es nula. La dirección varía para cada capa, pero el flujo promedio es de 90° a la derecha del viento prevaleciente (Figura 3).

² Imagen obtenida de Procesos Importantes en los mares chilenos: Las surgencias

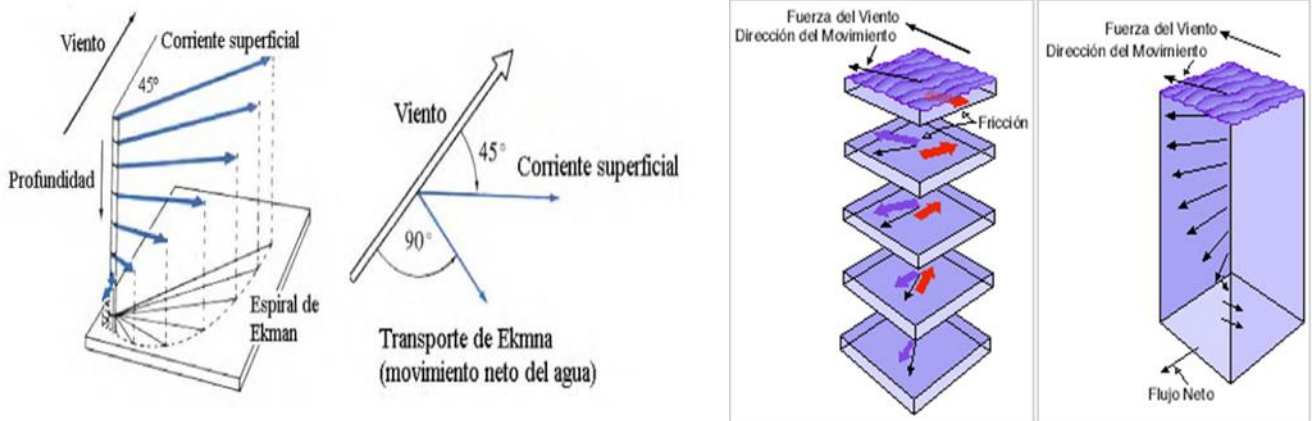


Figura 3. Movimientos de aguas subsuperficiales causados por la surgencia. Hemisferio norte (derecha)³, hemisferio sur (izquierda)⁴.

1.1.2.2. Surgencia por acción de vientos continentales.



Figura 4. Vientos Continentales.⁴

Ocurre con vientos que soplan desde el continente hacia el centro del océano y que alejan el agua próxima al borde costero, haciendo emerger aguas por surgencia.

³ Imagen obtenida de Estudio sobre la estacionalidad de la surgencia de Yucatan

⁴ Imagen obtenida de Procesos importantes de los mares chilenos: Las surgencias.

1.1.2.3. Surgencia en el océano abierto.



Figura 5. Océano Abierto.⁵

Es el caso de la surgencia ecuatorial debida a la divergencia producida por los vientos alisios que generan corrientes (Ecuatorial del norte y Ecuatorial del Sur) que transportan agua hacia la derecha al norte del ecuador y hacia la izquierda al sur, generando surgencia.

1.1.2.4. Surgencia por diferencias de densidad.

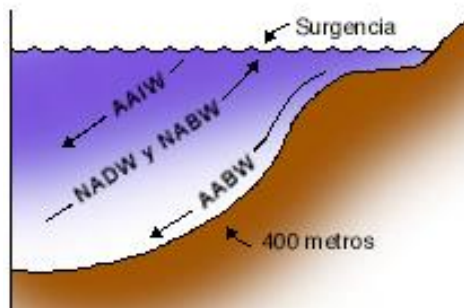


Figura 6. Diferencia de densidades.⁵

Las surgencias por diferencias de densidad son debidas a la circulación termohalina, en que el agua más densa se hunde y es remplazada por aguas menos densas.

⁵ Imagen obtenida de Procesos importantes de los mares chilenos: Las surgencias

1.1.3. Las surgencias en el Golfo de Tehuantepec

La temperatura promedio anual de la superficie del mar en el Golfo de Tehuantepec es de 25-30 °C durante todo el año en condiciones normales. El estrato superficial del mar, térmicamente homogéneo o casi homogéneo, tiene un espesor de 30-70 m en esta región. Esto indica que la termoclina permanente en el Golfo de Tehuantepec es somera. La profundidad promedio de la tapa de la termoclina es de 50 m, un poco menos profunda en invierno (30 m) y un poco más en verano (70 m). Esto quiere decir que durante el invierno, el agua de 22 °C o más fría se encuentra normalmente a unos 40 m de la superficie en toda el área del Golfo de Tehuantepec. Así, cuando aparecen los vientos “tehuanos” el agua superficial arrastrada por el viento se suple necesariamente con agua subsuperficial y agua superficial lateral. Es decir, los vientos “tehuanos” transfieren tanta energía mecánica que la turbulencia generada en el estrato superficial de mar eventualmente alcanza profundidades de decenas de metros, forzando la participación de aguas de estas profundidades, cuya temperatura es de hasta 10 °C más fría, en los movimientos de compensación vertical y desplazamiento horizontal. Este fenómeno se denomina “surgencia eólica” y es fácil de detectar y localizar debido a que la temperatura de la capa superficial del mar desciende varios grados centígrados (Gallagos, Barberan, 1998).

1.1.4. ¿Qué es el viento?

El segundo factor responsable por el cambio en la TSM en la zona costera del sur del Pacífico Mexicano es el viento a lo cual podemos entender como el movimiento de masas de aire provocado por diferencias de presión, el cual está definido por una dirección y una velocidad.

Este movimiento de masas de aire es debido a que el aire caliente se dilata y se vuelve menos denso, por lo que la presión atmosférica en la zona que abarca disminuye y tiende a elevarse. Lo contrario pasa con masas de aire más frío, este aumenta su densidad y por lo tanto la presión aumenta y este tiende a descender (Cuadrat, Pita, 2004).

1.1.4.1. Vientos en el Golfo de Tehuantepec

En el caso de esta zona costera, las fuertes corrientes de viento son el resultado de la combinación de condiciones meteorológicas a gran escala y las características topográficas locales. Estos vientos conocidos como Tehuanos se propagan cientos de kilómetros hacia el Pacífico produciendo un descenso considerable en la temperatura superficial del mar en el Golfo de Tehuantepec, generando grandes remolinos oceánicos.

Estudios previos han mostrado que los sistemas de alta presión formados sobre las Grandes Planicies de Norte América se mueven en dirección sureste cruzando los Estados Unidos de América, y algunos llegando hasta la Bahía de Campeche desarrollando una gran diferencia de presión entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec.

Este gradiente de presión produce fuertes vientos provenientes del norte a través de la brecha orográfica, los cuales pueden tener una duración de varias horas hasta tener una duración de 3 o 4 días, con velocidades de viento de 20 m s^{-1} y ráfagas arriba de los 30 m s^{-1} , seguidos por periodos de vientos ligeros (Romero-Centeno, et. al., 2003).

Estos vientos dominantes del norte, se introducen por el Golfo de México sin encontrar resistencia por las escasas elevaciones, presentando una elevada humedad al momento de entrar a tierra en la parte norte del Istmo. Sin embargo, van perdiendo humedad al atravesar el bosque de niebla de la Sierra Atravesada, generando precipitaciones en el norte del Istmo y produciendo un efecto de sombra orográfica de lluvia en el sur, por lo que estos vientos llegan secos al Golfo de Tehuantepec. Finalmente la masa de aire presenta el mínimo de humedad al momento de entrar al océano Pacífico a través de la escotadura orográfica conocida como “La Ventosa” en donde se han registrado vientos con velocidades de 30 m/s y ráfagas hasta de 50 m/s (Gallegos, Barberan, 1998).

De acuerdo con diferentes autores estos vientos dominantes se presentan entre los meses de octubre a marzo (Gallegos, Barberan, 1998), de noviembre a mayo (Castaneira, 2008) o de octubre a mayo (Bernard et al., 2009), este periodo cuando se presentan estos vientos es conocido como ‘cold season’, así

como también puede llegar a presentarse un evento característico en el mes de julio (Romero-Centeno, et. al., 2003).

De acuerdo con (Romero-Centeno, et. al., 2003), en el modelo de la variabilidad temporal de las medias mensuales de las velocidades del viento realizado con mediciones de vientos en las estaciones de La Venta y Salina Cruz, las estimaciones muestran fuertes vientos durante el invierno con valores máximos en diciembre y enero ($\sim 12.9 \text{ m s}^{-1}$), y vientos más débiles durante el verano con valores mínimos en mayo y junio ($\sim 7.0 \text{ m s}^{-1}$).

Una característica interesante que muestra la estimación del modelo y se puede observar también en las mediciones de las estaciones de La Venta y Salina Cruz, es un máximo relativo de la velocidad del viento en el mes de julio.

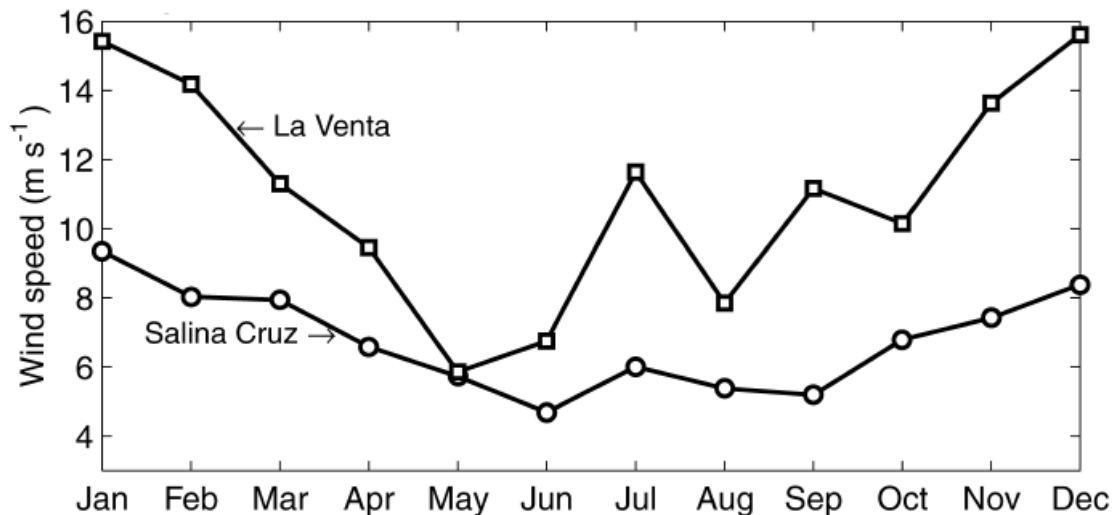


Figura 7. Medias mensuales de las observaciones de las velocidades del viento en las estaciones de La Venta y Salina Cruz.⁶

Tomando en cuenta la relación que existe entre la velocidad y dirección del viento, se sugiere dividir los vientos en dos categorías, el grupo del rango norte, que son los vientos provenientes del NNW, N y NNE, y un grupo diferente para los vientos provenientes de otras direcciones.

De Noviembre a Febrero, los vientos pertenecientes al primer grupo tienen una ocurrencia mayor al 75%, con frecuencias máximas durante Noviembre y Diciembre con una intensidad máxima en Enero. A partir de Marzo se observa un descenso en la ocurrencia de los vientos del grupo del rango norte, sin

⁶ Imagen obtenida de *Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal*

embargo la intensidad permanece alta hasta Abril. Durante la primavera tardía y el verano (Mayo-Septiembre), se observa un descenso considerable en la intensidad de los vientos provenientes del norte, aunque es posible observar un máximo relativo en Junio (Romero-Centeno, et. al., 2003).

En la década de los setentas, miembros de la comunidad de percepción remota, caracterizaron esta vigorosa respuesta superficial como, la formación de un área con forma de cuña emergiendo del golfo, que se extiende arriba de los 450 km fuera de la costa y seguida por la formación de un gran remolino anticiclónico al oeste del eje del viento, presumiblemente causado por el giro positivo del viento el cual debería estar presente al este del eje del viento (Trasviña, et. al., 1995).

Usando imágenes satelitales de altimetría en un lapso de 12 años (1992-2004), para caracterizar remolinos anticiclónicos de larga duración (Palacios, Bograd, 2005), observaron un total de 42 remolinos, con una duración de 250 días, empezando a finales de Octubre, y terminando a principios de Julio. Por otra parte en el reporte de la variabilidad interanual de la generación de remolinos generados durante la 'cold season' (Octubre-Abril) entre 1992 y 2000, basado en las anomalías a nivel de mar de los datos de altimetría de Topex/Poseidon (Zamudio, et. al., 2006), se formaron entre tres y cinco remolinos en cada 'cold season' entre los años de 1992 y 1996. En contraste durante el evento 'El Niño' (1997-1998) se formaron al menos siete remolinos. Durante el evento de 'La Niña', el cual afecto la 'cold season' de los años de 1998 y 1992 solamente se formaron dos y tres remolinos respectivamente.

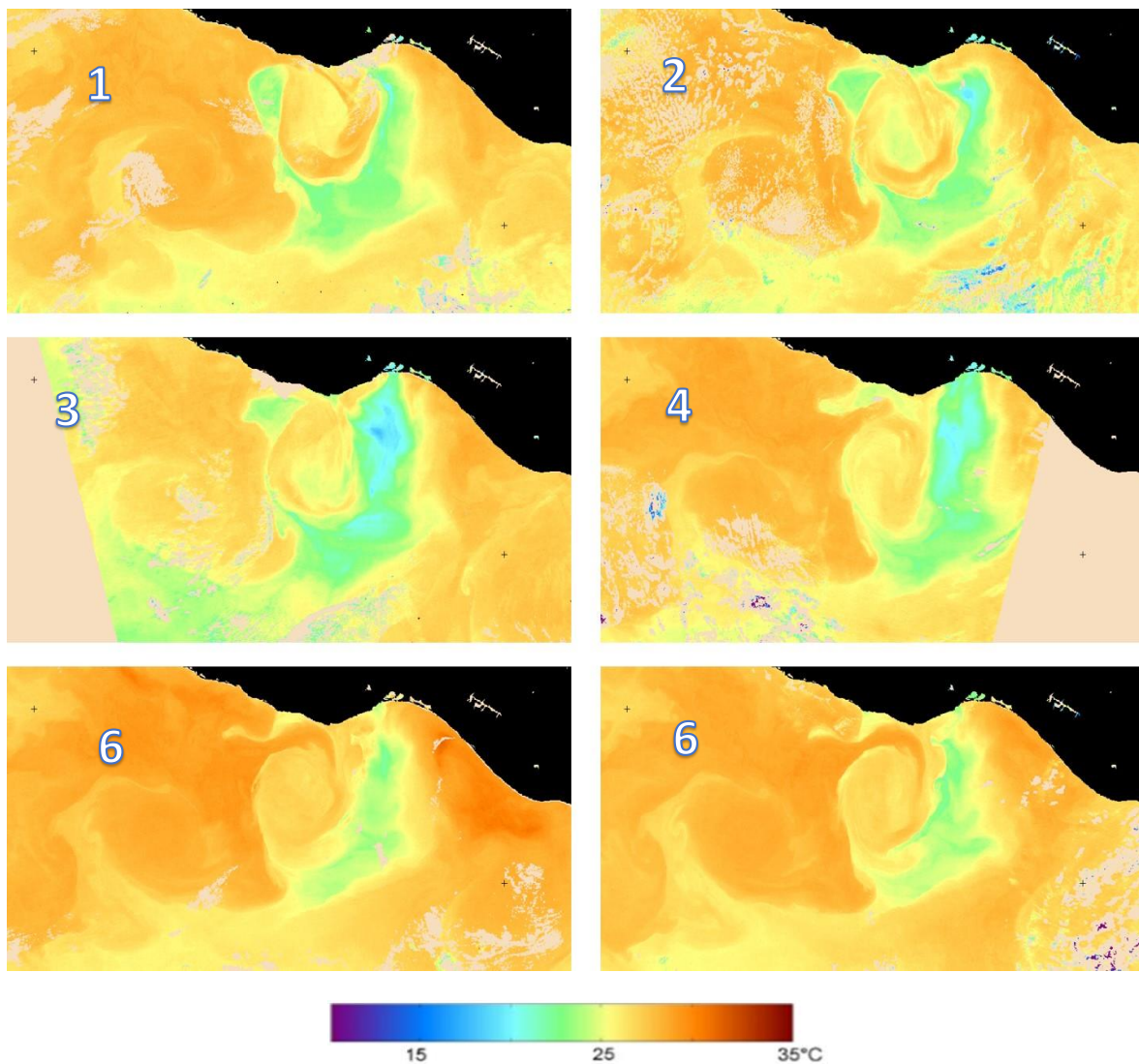


Figura 8. Evolución térmica del Golfo de Tehuantepec forzada por el viento en enero de 1996. Sucesión de seis imágenes satelitales; la primer imagen corresponde al 15 de enero de 1996 y la última al día 25 de enero de 1996⁷

⁷ Imagen obtenida del Banco de Información de la Temperatura de la Superficie de los Mares de México (BITSMEX)

1.2. OBJETIVO

Identificar el fenómeno climatológico “Tehuano” mediante el análisis de imágenes satelitales de temperatura superficial del mar utilizando procesos digitales en el periodo 1996 – 2013.

1.3. HIPÓTESIS

La variabilidad temporal y espacial del gradiente térmico de la TSM va a ser un efecto directo de los patrones de viento continentales en el Golfo de Tehuantepec.

1.4. ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de Tehuantepec se encuentra en el sureste del Pacífico mexicano, el cual cuenta con un área aproximada de 125,000 km², y está delimitado al norte por la costa mexicana comprendida entre Puerto Ángel, Oaxaca y Puerto Madero, Chiapas (Figura 9). En la frontera norte del Golfo de Tehuantepec se encuentra el estrecho continental conocido como Istmo de Tehuantepec, el cual está ubicado entre el Golfo de México y el Océano Pacífico, separando a la Sierra de Chiapas y la Sierra Madre del Sur, a una altitud promedio de 200 m sobre el nivel medio del mar. Esta brecha orográfica de 40 km de ancho en promedio también es conocida como “La Ventosa” o “El Paso de Chivela” (Figura 9), lugar por el cual el movimiento de masas de vientos sostenidos puede llegar a 30m/s con ráfagas de hasta 50 m/s. Estos últimos son mejor conocidos como Tehuanos (Gallegos y Barberán, 1998).

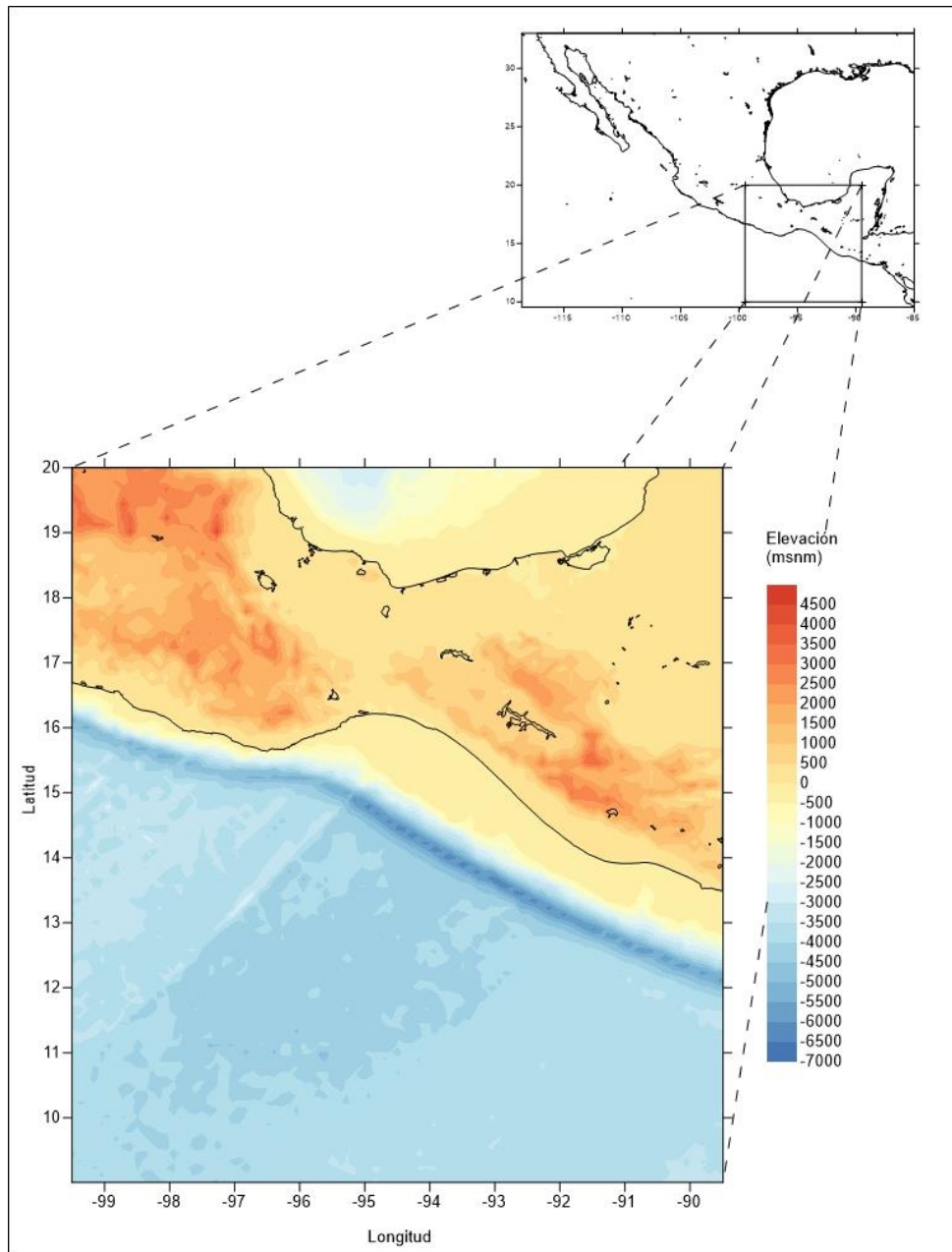


Figura 9. Ubicación geográfica del Golfo de Tehuantepec.⁸

⁸ Imagen obtenida con el software Surfer y datos de topografía obtenidos de http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi

1.5. JUSTIFICACION

El Golfo de Tehuantepec es una región pesquera y altamente productiva con importantes procesos físicos y ecológicos, como lo son los fenómenos de surgencias, aportes continentales de agua dulce y la presencia de grandes sistemas lagunares que en conjunto determinan una producción pesquera alta. Dichos sistemas están sujetos a impactos naturales o inducidos por el hombre, que influyen de manera directa o indirecta en la composición de especies y el funcionamiento del sistema. Su plataforma continental alberga diversidad de organismos bénticos, algunos de los cuales constituyen el soporte de pesquerías importantes de la región.

La región es considerada como sobresaliente, debido a que se ha caracterizado por presentar una importante actividad pesquera, en la que destaca la de altura de camarón y el desarrollo de pesca artesanal (Nuñez, Labastida, & Oviedo, 2013).

Otra característica sobresaliente consiste en la formación de un angosto “corredor” de condiciones óptimas en la productividad biológica por donde transitan los atunes, la cual se encuentra frente a Puerto Ángel, Oaxaca. Localmente, al tránsito por esta región se le conoce como “la corrida” y es aprovechada por la flota atunera del Pacífico Mexicano (Salas de León y Monreal-Gómez, 2005).

2. CONCEPTOS

2.1. Percepción Remota

Percepción Remota es la técnica de adquirir información de un objeto, área o fenómeno por medio de un sensor sin estar en contacto directo con el objeto área o fenómeno que está siendo investigado (Pérez, 2007).

De acuerdo a Chuvieco (1995), un sistema de percepción remota incluye los siguientes elementos:

- 1) La fuente de energía; se refiere al origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en este caso se habla de sensores pasivos (energía reflejada del Sol por la superficie), o de un haz emitido por el propio sensor (sensor activo).
- 2) La cubierta terrestre; formada por distintas masas de vegetación, suelos, aguas o construcciones humanas, las cuales reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- 3) El sistema sensor; compuesto por el sensor y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las superficies terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- 4) El sistema de recepción – comercialización; es en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.
- 5) El intérprete; analiza la información normalmente en forma de imágenes, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema de estudio.
- 6) El usuario final; encargado de analizar el producto resultante de la interpretación, así como determinar las consecuencias que de él se deriven.

2.2. Sensores

Los sensores son dispositivos electrónicos con la capacidad de detectar la variación de una magnitud física tal como temperatura, iluminación, movimiento y presión sin estar en contacto con el objeto de estudio, que en nuestro caso es la superficie terrestre, mediante la captación y registro de energía electromagnética proveniente de la superficie de la Tierra y poder convertir el valor de ésta, en una señal eléctrica, ya sea analógica o digital.

Sin embargo, por razones técnicas y atmosféricas. Los rangos más utilizados para uso de recursos naturales son de 0.4 a 13 micrones (visible e infrarrojo) y entre 30 y 300 milímetros (microondas) (Pérez, 2007; Peguero, 2016).

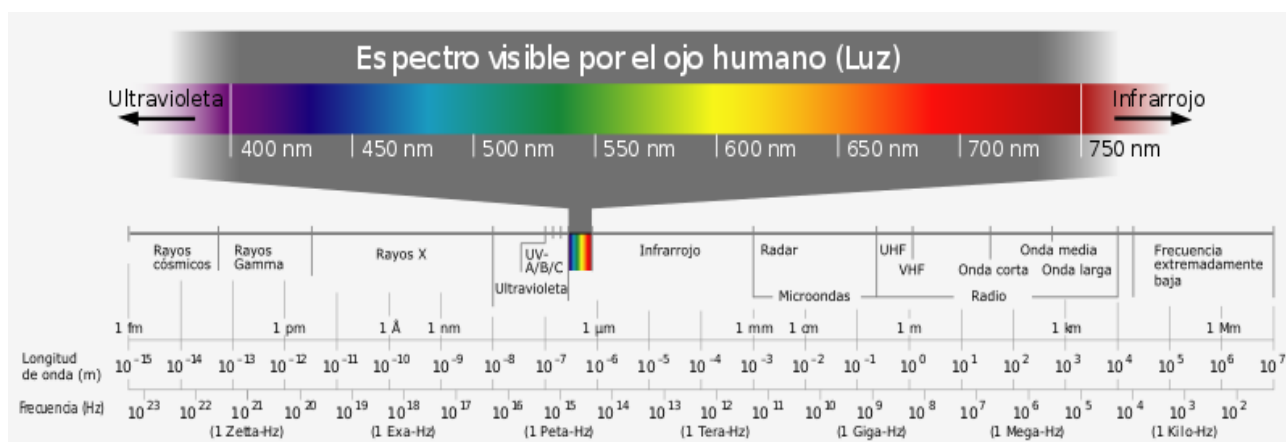


Figura 10. Espectro Electromagnético.⁹

2.2.1. Clasificación de los Sensores Remotos

La información obtenida para poder llevar a cabo la percepción remota es recabada mediante un sensor remoto, el cual fue explicado previamente. Estos instrumentos pueden ser llevados a bordo de plataformas como lo son los satélites, aeronaves tripuladas o aeronaves no tripuladas, cohetes o naves espaciales. Los sensores incluyen cámaras fotográficas aéreas e instrumentos no fotográficos, tales como radiómetros, sistemas de radar, etc. (Jensen, 2016).

Basados en la fuente de energía usada para activar el sensor, los sistemas de percepción remota se pueden dividir en dos clases: sensores pasivos y sensores activos. Los sensores pasivos son aquellos sistemas diseñados para

⁹ Imagen Obtenida de Wikipedia.

detectar la radiación electromagnética reflejada o emitida por objetos en la superficie. Los sensores activos describen un sistema diseñado para iluminar una superficie utilizando fuentes artificiales de radiación montadas en la plataforma. Mandando un pulso de radiación hacia la superficie, los sensores activos capturan este pulso que es reflejado o dispersado por objetos en la superficie.

La luz solar reflejada es la fuente de radiación más común percibida por los sensores pasivos. En estos sensores se incluyen:

- Radiómetro. Es un instrumento que cuantitativamente mide la radiancia de la radiación electromagnética que se encuentra en las regiones del visible, el infrarrojo o el microondas (AVHRR).
- Radiómetro de Imagen. Es un radiómetro que incluye la capacidad de escanear para proveer un arreglo de píxeles en dos dimensiones con el cual se puede producir una imagen. Este es comúnmente llamado escáner.
- Espectro-Radiómetro. Es un radiómetro que puede medir la radiancia en bandas multispectrales, tal como el Espectro-Radiómetro de Imagen de Resolución Moderada (MODIS) y el Espectro-Radiómetro de Imagen de Multi-Ángulo (MISR).

Dentro de estas dos clases, los sensores se pueden subdividir en cuatro grupos basados en las regiones del espectro electromagnético que usan para la adquisición de datos:

- 1) Sensores Ópticos /Infrarrojos.
- 2) Sensores de Microondas.
- 3) Sensores Térmicos.
- 4) LiDAR

Los sensores Ópticos/Infrarrojos usan las regiones del visible (0.3 - 0.7 micras), el infrarrojo cercano (0.72 - 1.30 micras) y el infrarrojo de onda corta (1.30 – 3.0 micras) del espectro electromagnético. Estos sensores pueden ser acomodados debido a su resolución espacial, para poder tener una mejor relación entre su configuración funcional y los tipos de aplicaciones ambientales que realizan (baja, media y alta resolución espacial).

Los sensores de baja resolución espacial, son aquellos que graban radiación electromagnética reflejada en escalas sobre los 500 m y mayores a 1000 km. Estos sensores se usan para captar información de grandes áreas geográficas lo cual los hace útiles para examinar perturbaciones y procesos ambientales a macro escalas (Lein, 2012).

2.3. Tipos de resoluciones en un sensor remoto

La resolución de un sensor se encuentra determinada por la capacidad del mismo de diferenciar los elementos existentes en el área observada, basándose en las diferencias de radiación obtenidas, y teniendo en cuenta el detalle de captura, la cantidad de bandas en las que trabaja y las variaciones existentes para diferentes periodos de tiempo.

El concepto de resolución implica al menos cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

2.3.1. Resolución Espacial

La resolución espacial de un sistema hace referencia a la porción de la superficie terrestre de la cual obtiene información y se determina por: Campo de visión instantánea (IFOV), el campo de observación y el pixel.

El concepto de IOFV (Instantaneous Field of View) se utiliza para definir la resolución espacial; se trata de la sección angular observada en un determinado momento a partir de un punto de vista concreto. La medida más usual del IFOV es la distancia sobre el terreno correspondiente a esa sección angular.

El pixel es la unidad mínima de observación que puede verse en una imagen.

La resolución espacial de los sensores que actualmente se encuentran en funcionamiento es variable, y depende de la misión para lo que se diseñaron. Como es lógico, al aumentar la resolución espacial se aumenta también el número de datos a procesar, por lo que suele estar inversamente relacionado con el tamaño del área cubierta en cada imagen. Si se trata de operar sobre grandes superficies, es conveniente contar con sensores de menor resolución que en estudios locales.

2.3.2. Resolución Espectral

Es la capacidad de un sensor para discriminar diversos rangos espectrales (bandas) o porciones del espectro electromagnético.

Esta capacidad está relacionada directamente con las características del sensor y limitada por las zonas de absorción de la atmósfera. Hace referencia al número de bandas espectrales que puede discriminar el sensor como también el ancho que éstas poseen.

A mayor resolución espectral que posea un sensor, podrá discriminar mejor entre cubiertas, ya que éstas se comportan de manera distinta según la banda del espectro que se considere.

2.3.3. Resolución Radiométrica

Es la sensibilidad del sensor para diferenciar pequeños cambios en la energía reflejada o en la radiancia que recibe. Lo normal es que se codifiquen en 256 niveles (0 a 255), aunque existen sensores capaces de discriminar hasta 1024 niveles, un ejemplo de estos es el NOAA-AVHRR.

2.3.4. Resolución Temporal

Es la capacidad con la que cuenta el sensor para producir imágenes de una misma área en diversos periodos de tiempo. Los factores que están relacionados son la altura de observación, la velocidad de orbita y el campo de visión que ofrezca el sensor.

Para los satélites meteorológicos, es preciso contar con una repetividad alta, ya que se está observando un fenómeno (la atmósfera) que por definición es cambiante. Es el caso de los satélites de este tipo como el Meteosat, que proporciona imágenes cada 30 minutos y el NOAA-AVHRR cada cuatro horas (Pleguero, 2002).

2.4. Sensores AVHRR

Radiómetro Avanzado De Muy Alta Resolución (por sus siglas en inglés AVHRR) llevado a bordo de la serie de Satélites Ambientales Operacionales de Órbita Polar (POES) NOAA. Es un radiómetro de escaneo de banda ancha que cuenta con cuatro o cinco canales o bandas diseñado para adquirir radiación

electromagnética reflejada en las regiones del visible e infrarrojo cercano del espectro y radiación electromagnética emitida en la región del infrarrojo térmico (3.55 y 12.50 **micras**).

El primer sensor AVHRR fue un radiómetro de cuatro canales el cual fue instalado en el satélite meteorológico TIROS-N en 1978. Este sistema inicial fue mejorado a un instrumento de cinco canales (AVHRR/2) puesto en órbita dentro del NOAA-7 en 1981. El último sensor AVHRR (AVHRR/3) es un instrumento de seis canales puesto en órbita en el NOAA-15 en 1998. El objetivo del sensor AVHRR es proveer información de radiancia para el estudio de nubes, límites tierra – agua, extensión de hielo y nieve, distribución de nubes en el día y la noche, temperaturas de radiación superficial y datos estimados de temperatura superficial del mar (Lein, 2011).

2.4.1. Especificaciones de los Radiómetros AVHRR

Escáner multiespectral de barrido con sensibilidad en las regiones del visible, infrarrojo cercano, medio y térmico del espectro electromagnético cuenta con las siguientes características (Martínez, 2005):

- Resolución espacial de 1.1 km en el nadir de observación.
- Resolución espectral de cinco bandas (visible, infrarrojo cercano y tres en el infrarrojo térmico).
- Resolución radiométrica de 10 bits (1023 niveles distintos).
- Resolución temporal mínima de 2 imágenes diarias por cada satélite para las latitudes correspondientes a México.
- Anchura de las imágenes de 2700 km aproximadamente.
- Píxeles por línea: 2048
- Ángulo de barrido: 55.4° a cada lado del nadir
- Bandas espectrales:

Tabla 1. Resolución espacial y espectral del sensor AVHRR¹⁰

| Bandas | Espectro Electromagnético | Tamaño de Pixel | Resolución Espectral |
|----------|---------------------------|-----------------|----------------------|
| Banda 1 | Visible | 1.1 Km. | 0.58 – 0.68 mm |
| Banda 2 | Infrarrojo Cercano | 1.1 Km. | 0.72 – 1.00 mm |
| Banda 3A | Infrarrojo Medio | 1.1 Km. | 1.58 – 1.64 mm |
| Banda 3B | Infrarrojo Medio | 1.1 Km. | 3.55 – 3.99 mm |
| Banda 4 | Infrarrojo Térmico | 1.1 Km. | 10.3 – 11.3 mm |
| Banda 5 | Infrarrojo Térmico | 1.1 Km. | 11.5 – 12.5 mm |

La banda 3A se ha incorporado a partir del satélite NOAA-15 y en horas diurnas sustituye al canal 3B.

La combinación de las diferentes bandas espectrales permite generar imágenes en falso color para destacar diferentes elementos de interés, un ejemplo de esto sería la combinación de las bandas 4 (rojo), 2 (verde) y 1 (azul).

2.4.2. Aplicaciones de datos obtenidos con el sensor AVHRR

Como se ha mencionado previamente este sensor cuenta con amplio intervalo de aplicaciones ambientales como lo son:

- Índices normalizados de vegetación (NDVI).
- Mapas de temperatura superficial del mar (TSM).
- Aplicaciones hidrológicas: cartografía de zonas de nieve, extensiones de agua por aluviones o riadas, humedad del suelo.
- Recursos renovables: detección y seguimiento de incendios.
- Análisis de usos de suelos: efectos urbanos, ordenamiento territorial.
- Aplicaciones geológicas: cartografía litográfica, tectónica.
- Riesgos Naturales: volcanes, terremotos, inundaciones, incendios.
- Aplicaciones marítimas: turbidez de aguas, mareas negra o roja, surgencias.
- Aplicaciones climáticas: tormentas, nubosidad, vientos.

¹⁰ Tabla obtenida de Fundamentos de Teledetección Espacial (Martinez, 2005)

2.5. Satélites NOAA

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) dispone de un programa de estudios de los fenómenos climáticos, de una serie de satélites meteorológicos en órbita geoestacionaria y en órbita polar.

Para la predicción del tiempo a corto plazo, utiliza los satélites en órbita geoestacionaria, GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), mientras que para predicciones a más largo plazo utiliza los satélites en órbita polar, los POES (Polar Orbiting Operational Environmental Satellites).

Estos satélites de órbita polar llevan en su carga útil el sensor AVHRR, que debido a las características previamente mencionadas con las cuales cuenta, es posible complementar las funciones de observación meteorológica, con la observación de la Tierra.

Los satélites gestionados por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos) hoy en día operativos, son los descendientes de los primeros satélites de observación de la Tierra construidos en la década de los 60s con objetivos meteorológicos. El punto de partida se sitúa en 1960 con el lanzamiento del satélite TIROS-1 (Television and Infra-Red Observation Satellite). Desde entonces, las sucesivas mejoras en los sistemas de capacitación de imagen (desde cámaras de televisión a radiómetros multiespectrales) han supuesto la fabricación de toda una serie de instrumentos cada vez más sofisticados. El último de estos es el AVHRR, con cinco canales espectrales, que ha sido embarcado en los satélites de esta serie desde 1978 (del NOAA-7 hasta el NOAA-14). La última innovación ha sido la incorporación del canal espectral dedicado a la observación de la nieve y el hielo, implementado en el NOAA-15 desde mayo de 1998; este canal se activa solo de día.

La explotación de la serie NOAA garantiza que en todo momento hay un par de satélites funcionando sincronizados, de manera que asegura la observación de cualquier área de la Tierra con un intervalo máximo de 6 horas (Martínez, 2005).

3. MATERIALES Y METODOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron imágenes de los satélites NOAA de la serie 12 a 19, debido a las especificaciones del sensor instalado en estos satélites (AVHRR), el cual entre las diferentes aplicaciones de carácter meteorológico, cuenta con la estimación de la temperatura superficial del mar.

También se usaron los programas *ArcGIS* y *Matlab* así como el sistema operativo Linux para la obtención de resultados.

3.1. Recolección de imágenes satelitales del sensor AVHRR

El proceso inició con la recolección de imágenes satelitales que abarcan el periodo de 1996 a 2013, de la antena ubicada en el Instituto de Geografía de la UNAM. Usando el algoritmo *hrptin* del software *TeraScan*, el cual convierte la información de paso a un formato especial propio de *TeraScan*. Posteriormente se ejecuta el comando *avcal* el cual calibra los datos en porcentaje de albedo para los canales 1 y 2 del sensor, y la información de los canales 3, 4 y 5 son calibrados en términos de temperatura de brillo. Estos datos pueden ser expresados en grados Celsius o grados Kelvin.

Una vez hecho esto se procede a ejecutar el comando *avfix* el cual corrige las líneas con falta de información o información errónea. Después se ejecuta el comando *avfilt3* el cual es un filtro que se le aplica al canal tres, realizando promedios de los pixeles más cercanos a los pixeles que no contenían información, esto debido a que este canal en especial presento líneas de error en la imagen.

3.2. Obtención de los valores de Temperatura Superficial del Mar

Finalmente para el cálculo y obtención de la TSM, se ejecutó el comando *nitpix*. Este proceso incluye tres pasos, primero excluir valores tomados a grandes ángulos a partir del nadir, después se identifican los pixeles de la imagen que estén contaminados con nubes para poder excluirlos, y finalmente

se aplica el algoritmo elegido para el cálculo de temperatura superficial del mar a los píxeles libres de nubes.

El procedimiento de excluir datos que se encuentren a grandes ángulos a partir del nadir, *TeraScan* lo realiza automáticamente excluyendo los datos que estén a más de 60° a partir del nadir.

El segundo paso que realiza *TeraScan* para la obtención de la TSM es el de identificar los píxeles identificados como nubes. Esto se hace mediante cinco criterios.

- I) La diferencia en el Canal 4. Como sabemos la presencia de píxeles de nubes puede cambiar la temperatura de brillo aparente. Si asumimos que la TSM está variando lentamente, y encontramos una gran variación en un área local, esto puede estar indicando la presencia de nubes. Si se observa en una región de 3x3 píxeles, la diferencia entre sus valores máximo y mínimo es mayor al valor seleccionado el píxel central se marca como contaminado con nubes.
- II) El valor máximo de albedo en el Canal 2. Un gran albedo en el canal 2 indica la presencia de nubes. Esto es si el albedo de un píxel excede el 8% para el día y 2% para la noche, el píxel será marcado como contaminado con nubes.
- III) La diferencia en el Canal 2. Una gran variación en el albedo en el canal 2 puede indicar la presencia de nubes. Si se observa una región de 3x3 píxeles, una diferencia de albedo mayor del 2% entre el valor máximo y mínimo se asume que el píxel central contiene nubes. Este criterio solamente se aplica para información de día.
- IV) Diferencia en el Canal 3 y 4. Estos dos canales absorben una gran cantidad de vapor de agua. Una mayor diferencia en la temperatura de brillo en estos dos canales indica la presencia de nubes. Debido a que el canal 3 puede contener luz solar reflejada, este criterio solo se aplica para información de noche.
- V) Temperatura mínima en el Canal 4. Si la temperatura en el canal 4 es muy baja, se puede asumir que se está observando temperaturas de la parte superior de las nubes. Este criterio no se usa debido a que se aceptan temperaturas mayores a 0 °C.

Una vez aplicados todos estos criterios para la discriminación y eliminación de las nubes, el software procede a realizar el tercer y último paso para realizar el cálculo de la TSM mediante alguno de los algoritmos disponibles. En este caso el algoritmo elegido fue el de Split-Window (Multi-Channel) (Monaldo, 1997).

Esto es posible para mediciones en regiones libres de nubes y tiene la forma:

$$T = a_0 T_i + a_1 (T_i - T_j) + a_2$$

Donde T_i y T_j son temperaturas de brillo determinadas desde los valores de radiancia en dos canales infrarrojos i y j . La constante a_0 se aproxima a 1 sugiriendo que la temperatura infrarroja medida en cualquiera de estos canales es aproximada a la TSM. El término $a_1 (T_i - T_j)$ hace una pequeña corrección para la transmitancia atmosférica. El término a_2 es un factor de corrección asociado a la diferencia de temperatura de brillo en diferentes canales.

En general existen tres clases diferentes de algoritmos. El algoritmo "Split Window", utiliza la temperatura de brillo de T_{11} como la estimación de orden más bajo de la TSM y la diferencia $T_{11} - T_{12}$ para hacer la corrección para la atmosfera. El algoritmo "Dual Window", utiliza la temperatura de brillo de T_{11} y la diferencia $T_{3.7} - T_{11}$ para hacer la corrección para la atmosfera. Finalmente el algoritmo "Triple Window", utiliza el brillo de T_{11} y la diferencia $T_{3.7} - T_{12}$ para hacer la corrección para la atmosfera.

Además, existen factores de corrección que deben ser aplicados para ajustar las medidas hechas fuera del nadir. Si definimos θ como el ángulo zenital del sensor, entonces tenemos tres algoritmos:

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

Dual (bz). $T_s = A_0 T_{11} + A_1 (T_{3.7} - T_{11}) + A_2 (T_{3.7} - T_{11}) (\sec \theta - 1) + A_3 \sec \theta + A_4$

Triple (tw). $T_s = A_0 T_{11} + A_1 (T_{3.7} - T_{12}) + A_2 (T_{3.7} - T_{12}) (\sec \theta - 1) + A_3 \sec \theta + A_4$

Donde T_{11} es la temperatura de brillo del canal cuatro del sensor, T_{12} es la temperatura de brillo del canal cinco del sensor y ambas pueden estar en Kelvin o Celsius, y A_0 , A_1 , A_2 , A_3 y A_4 son parámetros que el sistema *TeraScan* utiliza para el cálculo de la TSM, y solamente A_4 varía dependiendo si la temperatura está en Kelvin o Celsius (Monaldo, 1997).

Tabla 2. Coeficientes para el algoritmo Split Window

| Satélite | Tiempo | A_0 | A_1 | A_2 | A_3 | $A_4(K)$ | $A_4(C)$ |
|-----------|--------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|
| NOAA – 14 | D | 1.017342 | 2.139588 | 0.779706 | 0.000 | 5.280 | 0.543 |
| NOAA – 14 | N | 1.029088 | 2.275385 | 0.752567 | 0.000 | 9.090 | 1.145 |
| NOAA – 12 | D | 1.013674 | 2.443474 | 0.314312 | 0.000 | 4.647 | 0.912 |
| NOAA - 12 | N | 1.013674 | 2.443474 | 0.314312 | 0.000 | 4.647 | 0.912 |

Una vez realizados los ajustes necesarios a las imágenes diarias, mediante el uso de comandos en el sistema *Linux* se fueron promediando grupos de siete imágenes para poder obtener imágenes semanales siguiendo el siguiente criterio:

- Del día 1 al día 7 – Primer Semana
- Del día 8 al día 15 – Segunda Semana
- Del día 16 al día 22 – Tercer Semana
- Del día 23 al día 30 o 31 – Cuarta Semana

Estas nuevas imágenes obtenidas se volvieron a promediar cada cuatro semanas para obtener las imágenes mensuales correspondientes para después generar archivos ASCII para así poder continuar con él análisis.

3.3. Georreferenciación de las imágenes.

Una vez obtenidos todos los archivos ASCII de todas las imágenes mensuales de los 18 años de estudio y para cada satélite usado, se procedió a usar el módulo de *ArcCatalog* el cual es un componente del software *ArcGIS*, para convertir todos los archivos ASCII a imágenes raster y poder continuar con el tratamiento digital de las imágenes previamente obtenidas.

Debido a que se realizó un estudio espacio-temporal fue de vital importancia que las imágenes que se utilizaron estuvieran georreferenciadas. Esto se realizó con ayuda de *ArcMap* el cual es otro componente del software *ArcGIS*, haciendo uso de la herramienta *Georeferencing*, una serie de 42 puntos de control previamente definidos usando distintas herramientas cartográficas como mapas y cartas topográficas de INEGI así como la herramienta de Google, repartidos por todo el litoral mexicano, abarcando parte de Centro América y el sureste de Estados Unidos, así como también un método de ajuste.

Usando un ajuste polinomial de tercer grado se obtuvo un RMS de 0.0191285 grados decimales.

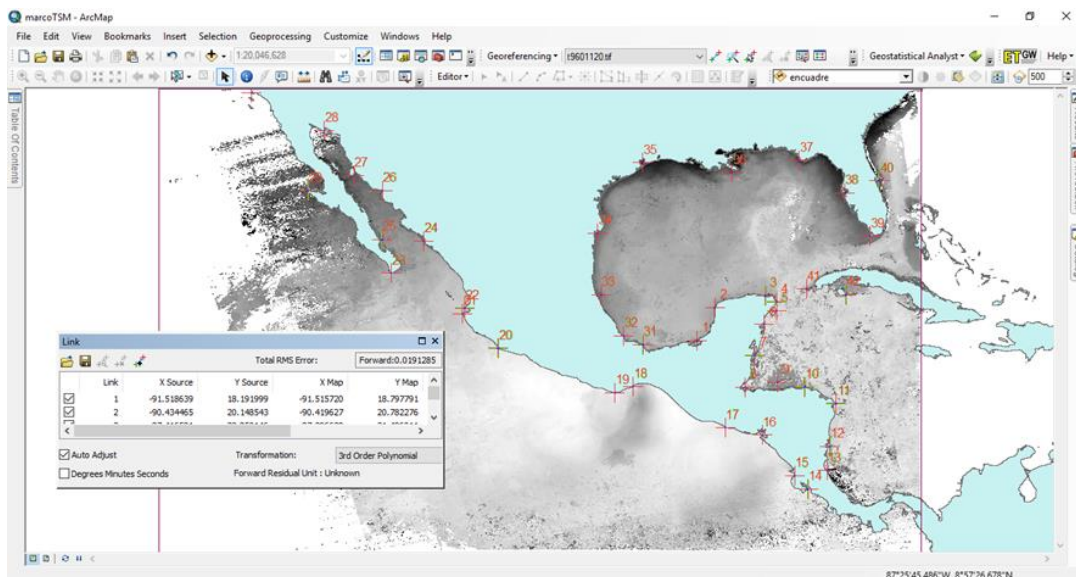


Figura 11. Georreferenciación de las imágenes.

3.4. Diseño de los Transectos

Una vez georreferenciadas todas las imágenes se diseñó una serie de transectos los cuales son necesarios para estudiar el comportamiento de la TSM en el área de estudio.

Esto se hizo usando la herramienta Draw de *ArcMap*, dibujando cinco transectos paralelos a la costa y seis perpendiculares a la costa.

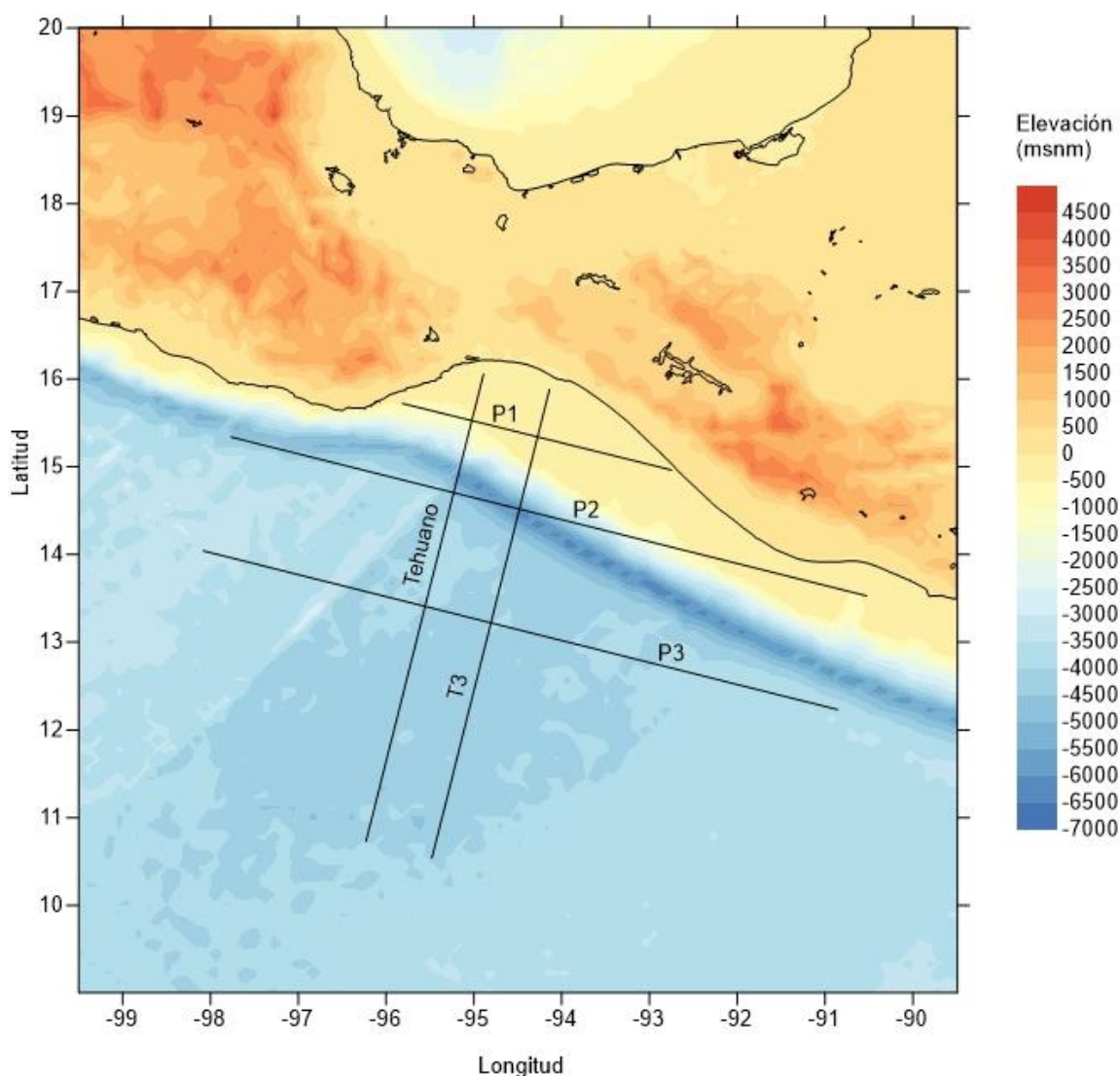


Figura 12. Transectos de estudio.

Tabla 3. Transectos paralelos a la costa

| Transecto | Latitud | | Longitud | |
|-----------|------------|-----------|------------|------------|
| | Norte | Sur | Este | Oeste |
| P1 | 15.722025 | 14.959425 | -95.808088 | -92.749488 |
| P2 | 15.344925 | 13.532125 | -97.757188 | -90.528888 |
| P3 | 14.043225 | 12.230325 | -98.081788 | -90.853388 |
| P4 | 12.741525 | 10.928625 | -98.406388 | -91.177988 |
| P5 | 11..452725 | 10.690225 | -96.872588 | -93.813988 |

Tabla 4. Transectos perpendiculares a la costa

| Transecto | Latitud | | Longitud | |
|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| | Norte | Sur | Este | Oeste |
| T1 | 15.344947 | 12.741547 | -98.406388 | -97.757188 |
| T2 | 15.722047 | 11.452747 | -96.872588 | -95.808088 |
| Tehuano | 16.063552 | 10.725996 | -96.216789 | -94.883989 |
| T3 | 15.878947 | 10.541391 | -95.477488 | -94.144688 |
| T4 | 14.959447 | 10.690247 | -93.813988 | -92.749488 |
| T5 | 13.532147 | 10.928647 | -91.177988 | -90.528888 |

3.5. Extracción de valores de TSM y generación de gráficas para cada transecto.

Una vez diseñados todos los transectos a usar en el estudio, con ayuda del software Matlab se diseñaron scripts que extrajeran los valores de cada pixel que se intersectaran con los transectos, de las imágenes mensuales de los 18 años, para así poder graficar cada valor organizándolos en gráficas seleccionando el mismo mes pero de diferente año (enero 96 – enero 13) y poder analizar el comportamiento de la TSM.

Evidentemente al ser datos crudos solamente cuentan con las correcciones que se realizaron al momento de adquirir las imágenes, por lo tanto fue necesario aplicar algoritmos para quitar todo el ruido que pueda tener la información como valores erráticos, temperaturas muy altas o muy bajas mediante el uso de scripts diseñados en Matlab.

En el primer script se eliminaron todos los valores que no fueran lógicos, los valores que estuvieran por arriba de los 35 °C y por debajo de los 10 °C. Esto debido a que la temperatura anual promedio de la región es de 25 - 30 °C (Gallegos y Barberan, 1998).

Posteriormente con la herramienta Basic Fitting se realizó un ajuste polinomial de décimo grado para seguir eliminando el ruido, suavizar las gráficas para poder apreciar mejor el comportamiento de la TSM, en cada uno de los meses para todos los años.

Una vez acabado este proceso de eliminación de todo el ruido posible se procedió a generar los meses típicos promediando todos los meses para cada uno de los transectos del estudio y poder unir toda la información en gráficas correspondientes a la zona de cada uno de los transectos.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos pueden ser interpretados como variaciones de carácter temporal, variaciones de carácter espacial o como la unión de ambas variaciones (espacio-temporal). Esto debido a que se realizó usando imágenes durante un periodo de 18 años (1996 – 2013) (temporal), así como usando transectos que cubrieran la zona correspondiente al estudio (espacial), permitiendo identificar y señalar el comportamiento del fenómeno climatológico “Tehuano.”

4.1. Análisis Espacio - Temporal

Consiste en la observación del comportamiento de la TSM en el periodo de enero de 1996 a diciembre del 2013 en un dominio definido.

Esto se puede mediante la extracción de información de cada pixel que se intersecta con un transecto previamente definido para posteriormente generar las gráficas que representen el comportamiento de la TSM (variabilidad espacial).

Una vez obtenidas las gráficas de cada uno de los meses para todos los años, estas se pueden acomodar por año en una nueva gráfica y así poder representar la evolución del fenómeno climatológico “Tehuano” para cada transecto en el transcurso de un año (variabilidad espacio - temporal). Ello es posible debido a que estas imágenes se encuentran en un arreglo matricial, en donde cada valor contenido en una celda de esa matriz nos representa un pixel de la imagen.

Para poder generar las gráficas previamente mencionadas solamente se tomaron en cuenta seis meses (octubre – marzo) de los 12 meses disponibles, debido a que es en este lapso conocido como “cold season” es cuando se presenta la interacción de diferentes presiones atmosféricas entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, lo cual provoca vientos intensos e intermitentes generando los “Tehuanos” (Aguirre Raúl, 2002).

Como se había explicado previamente en el capítulo de Materiales y Métodos, para poder realizar este estudio se diseñaron 11 transectos de los cuales solamente cinco mostraron información significativa, representados en la *figura 12*.

De los cinco transectos, los primeros dos muestran el comportamiento de la TSM a lo largo del “Tehuano” debido a que fueron diseñados de norte a sur que es la dirección que tiene dicho fenómeno. Los tres transectos siguientes fueron diseñados de oeste a este para que además de mostrar la variación del gradiente térmico nos muestran la amplitud del “Tehuano” en diferentes latitudes conforme nos alejamos de la costa.

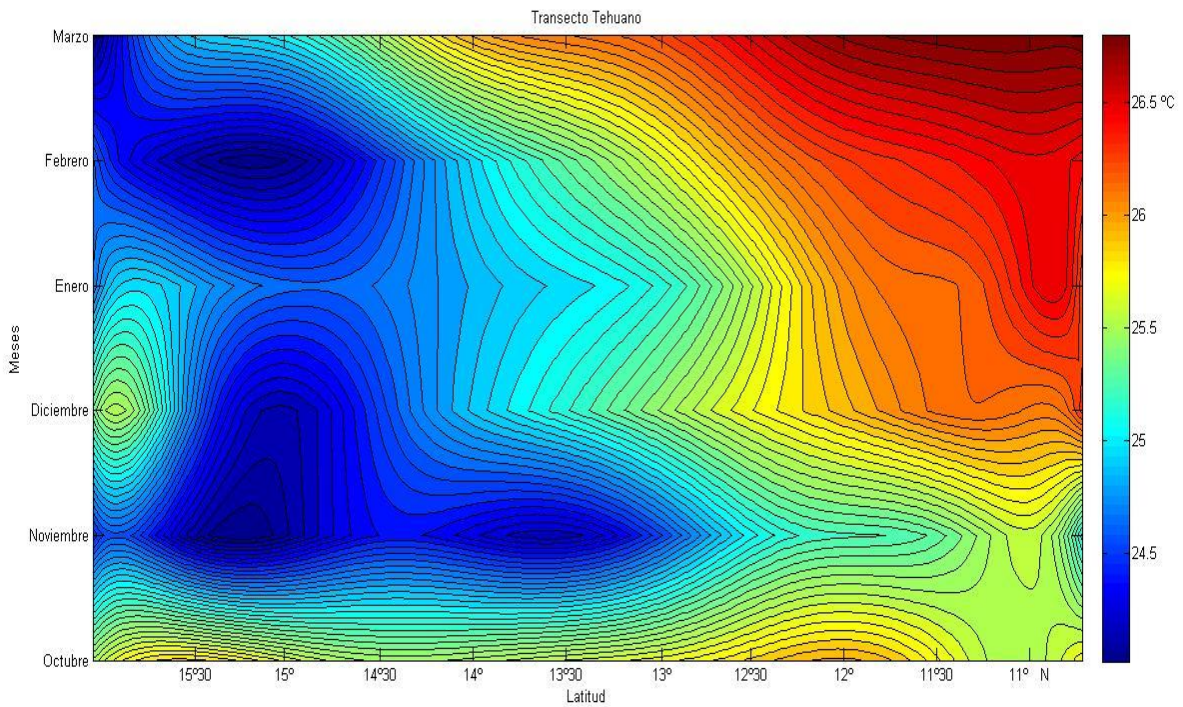


Figura 13. Meses típicos transecto Tehuano.

El transecto tehuano se trazó sobre el espacio donde se manifiesta la mayor variación de la TSM. Se puede observar que para las latitudes elevadas del transecto, para el mes de octubre típico, la temperatura tiene valores entre los 26.0 y 25.5 °C y conforme pasa el tiempo la temperatura disminuye por debajo de los 24.5 °C o menos para después comenzar el calentamiento progresivo del agua superficial. Lo mismo pasa en las latitudes bajas del transecto, en donde se puede observar con más claridad el incremento de la TSM conforme avanza el tiempo, observando valores mínimos cercanos a los 25.0 °C en el mes de noviembre y valores máximos cercanos a los 27.0 °C en los últimos meses.

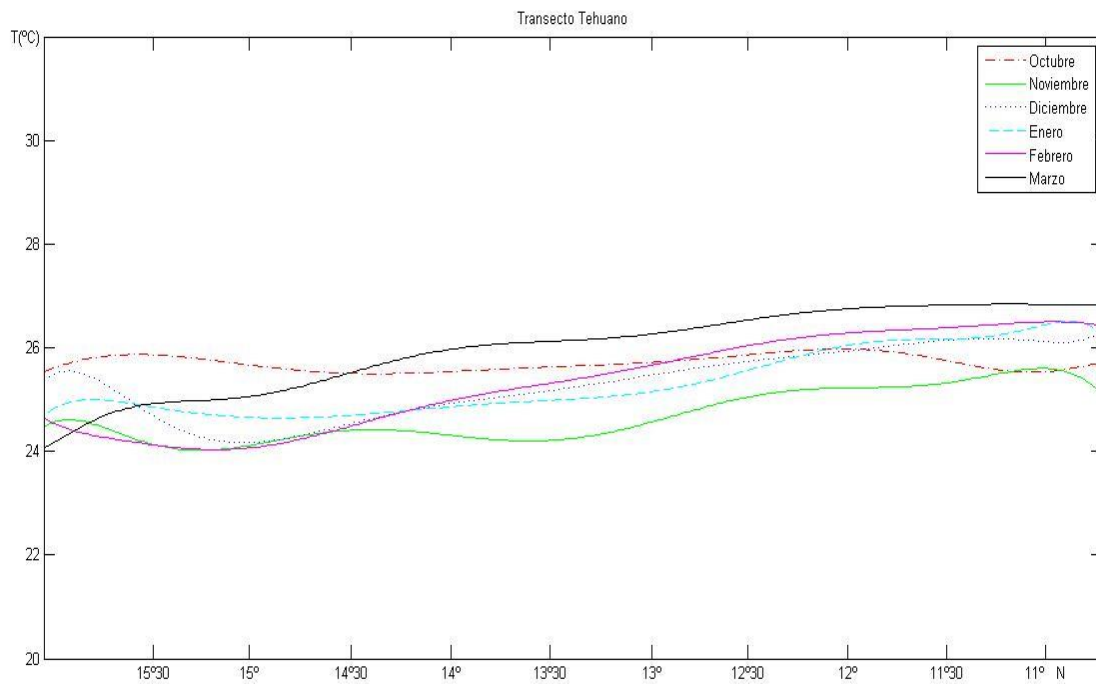


Figura 14. Transecto Tehuano. Eje X: Latitud. Eje Y: Temperatura.

Con respecto al análisis espacial podemos observar el decremento e incremento del gradiente térmico observando valores mínimos entre los meses de noviembre y febrero, entre los 15°30' y 14°30' de latitud norte y conforme avanzamos sobre el transecto hacia afuera de la costa se presenta un incremento del gradiente térmico de alrededor 3.0 °C llegando casi a los 27.0 °C en el mes de marzo en latitudes menores a los 11°00' de latitud norte. Esto sucede debido a que conforme el Tehuano se aleja de la costa va perdiendo fuerza.

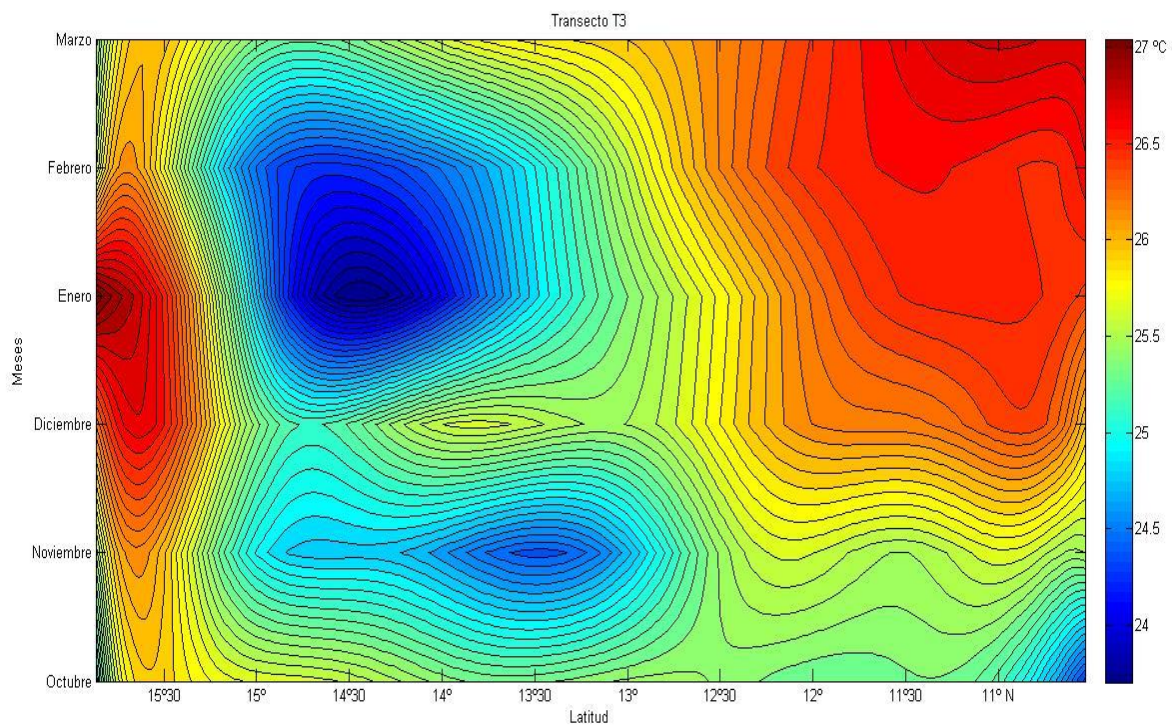


Figura 15. Meses típicos transecto T3

En el transecto T3 podemos observar un comportamiento muy parecido al transecto tehuano debido a que es paralelo al transecto anterior y perpendicular a la costa, el cual difiere en tener una ubicación 80 km al sureste, razón por la cual este transecto solamente recogió información de la parte externa en el este del “Tehuano”. El transecto nos muestra que desde el inicio y hasta los 14°30' de latitud norte para el mes de enero existe un gradiente térmico de -3.4 °C (27.1 °C a 23.7 °C) y a partir de esa misma latitud el gradiente térmico es de 3.0 °C (23.7 °C a 26.7 °C) hasta llegar al fin del transecto. Temporalmente podemos observar que para las latitudes más al norte entre los 15°00' y 14°00' de latitud norte del transecto, en el periodo de tiempo de diciembre a febrero se presentan las temperaturas más bajas del transecto siendo en enero en donde se presenta el valor mínimo, al igual que para el mes de noviembre se puede observar una disminución en la temperatura menos con valores de la TSM entre los 25 – 24 °C.

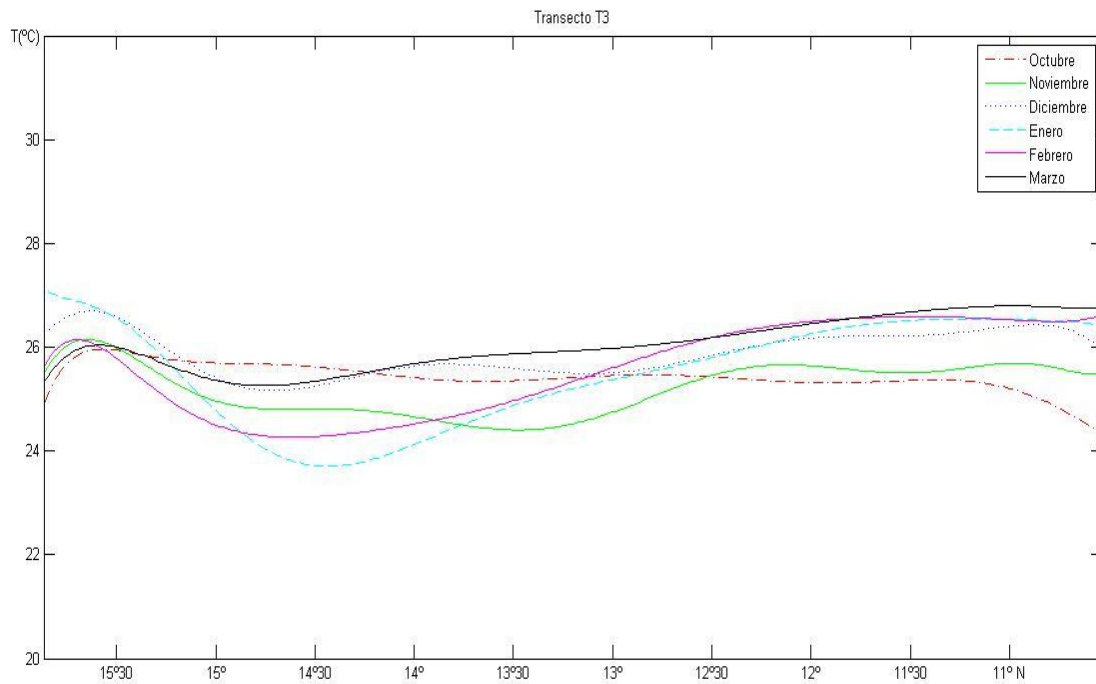


Figura 16. Transecto T3. Eje X: Latitud. Eje Y: Temperatura.

En la figura 16 que corresponde al transecto T3 es posible observar que los meses típicos más fríos son enero y febrero y esto se puede entender que es debido a que en este tiempo entre estos dos meses se encuentra la mitad del periodo en el que ocurre el Tehuano. Por otro lado se puede observar la parte del “Tehuano” que registro este transecto, la cual se encuentra entre los 15°30’ de latitud norte hasta los 13°00’ de latitud norte aproximadamente, siendo así la parte exterior del giro anticiclónico que se genera.

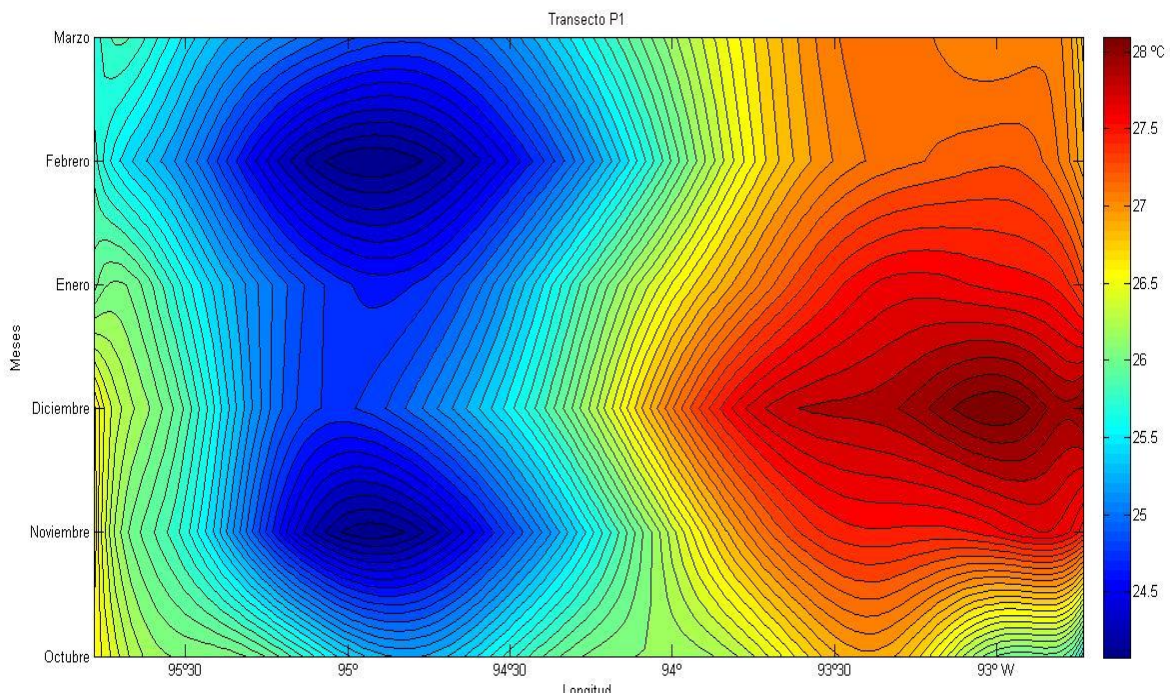


Figura 17. Meses típicos transecto P1

En este primer transecto paralelo a la costa, el cual se encuentra 85 km mar adentro a partir de la misma. Se puede observar cómo el Tehuano tiene un mayor efecto en la parte norte - noroeste del Golfo de Tehuantepec mostrando un gradiente térmico de aproximadamente $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $24.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) desde el inicio del transecto hasta pasar los $95^{\circ}00'$ de longitud oeste, alcanzando valores mínimos de la TSM ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $24\text{ }^{\circ}\text{C}$) para todos los meses. A partir de esa longitud el gradiente térmico cambia aproximadamente a $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($24.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $28\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta el final del transecto.

Esto se debe a que este extremo tiene el agua más fría debido a que el viento "Tehuano" llega a la costa con más fuerza y más encausado por la topografía que la que tiene decenas de kilómetros mar adentro (Gallegos y Barberan, 1998).

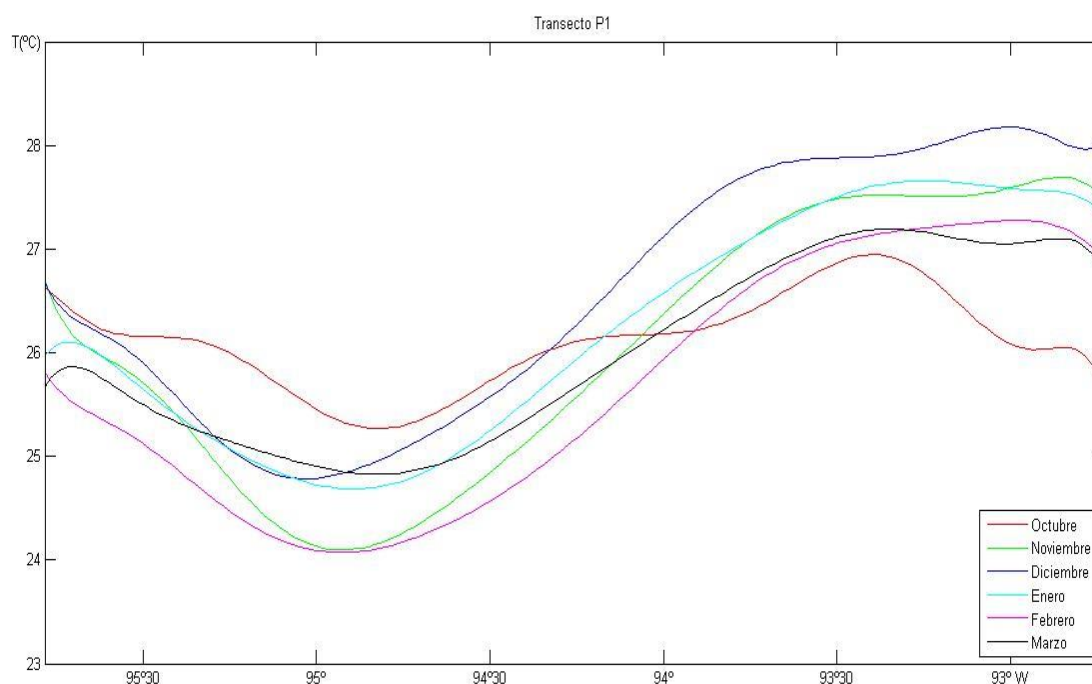


Figura 18. Trasecto P1. Eje X: Longitud. Eje Y: Temperatura.

En la figura 18 es posible observar el diámetro de acción que tiene el Tehuano para las latitudes correspondientes a este transecto, es aproximadamente de 150 km, esto debido a que el transecto se encuentra muy cercano a la costa por lo tanto no es tan amplio el efecto, pero es donde se observa una variación del gradiente térmico más significativa. Se puede observar que al inicio del transecto el mes de octubre es el mes típico más cálido y febrero y marzo los meses típicos más fríos. Al final del transecto, octubre pasa a ser el mes más frío con una temperatura entre los 25.5 °C y 26.0 °C y el mes más cálido es diciembre pasando los 28.0 °C.

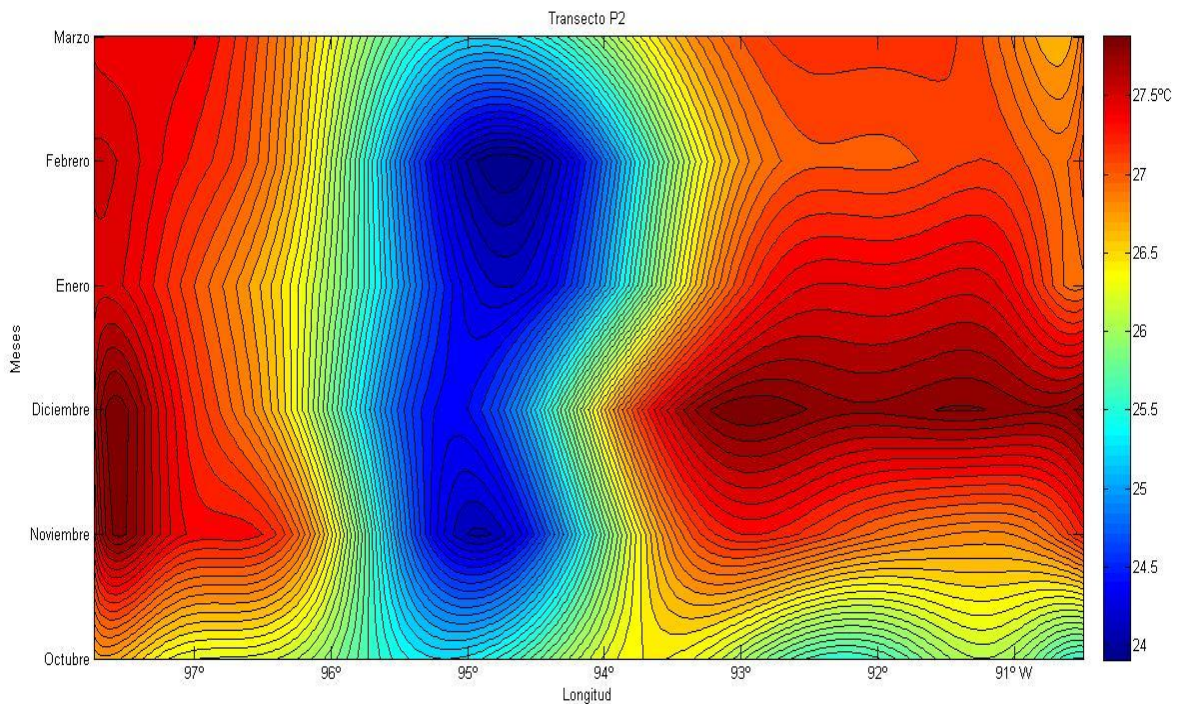


Figura 19. Meses típicos transecto P2

En este segundo transecto paralelo a la costa situado a 180 km de la misma, se puede observar para los meses de noviembre y febrero un gradiente térmico de $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($28\text{ }^{\circ}\text{C}$ $24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) a partir de los $96^{\circ}30'$ de longitud oeste hasta un poco antes de los $94^{\circ}30'$ de longitud donde llega al valor mínimo de la TSM para ese transecto. A partir de ese punto el gradiente térmico es de $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $28\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta poco antes de los 93° de longitud oeste, para después continuar con valores más uniformes de la TSM hasta el final del transecto. Se puede observar también que entre los 96° y los 94° de longitud oeste se encuentran los valores más bajos de la TSM en comparación con los demás valores de todo el transecto, por lo tanto se puede pensar que es en este espacio donde el Tehuano tiene un mayor efecto sobre la superficie del mar.

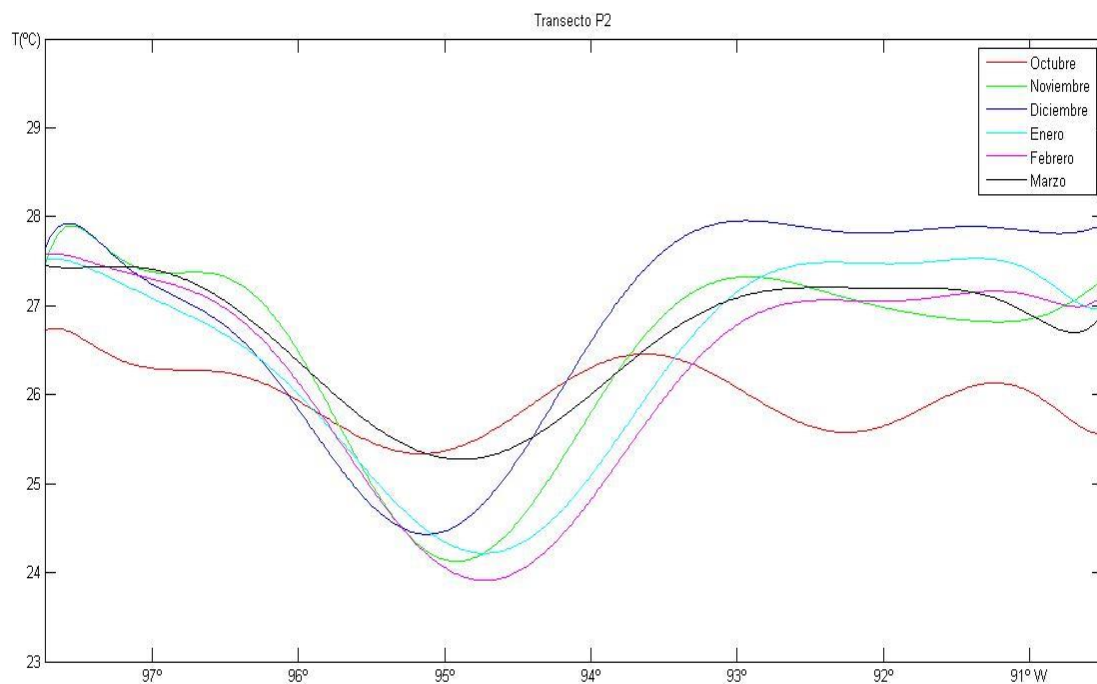


Figura 20. Transecto P2. Eje X: Longitud. Eje Y: Temperatura.

En la figura 20 es posible observar el diámetro de acción del Tehuano para la latitud correspondiente a este transecto es un poco mayor a los 200 km aproximadamente. Esto puede deberse a que conforme nos alejamos de la costa el viento va perdiendo fuerza y se dispersa en todas direcciones lo que ocasiona que los valores de la TSM sean mayores en comparación con el transecto anterior.

Otro rasgo que es notorio es el desplazamiento del fenómeno $0^{\circ}30'$ hacia el oeste siguiendo el sentido anticiclónico característico de los vientos "Tehuano".

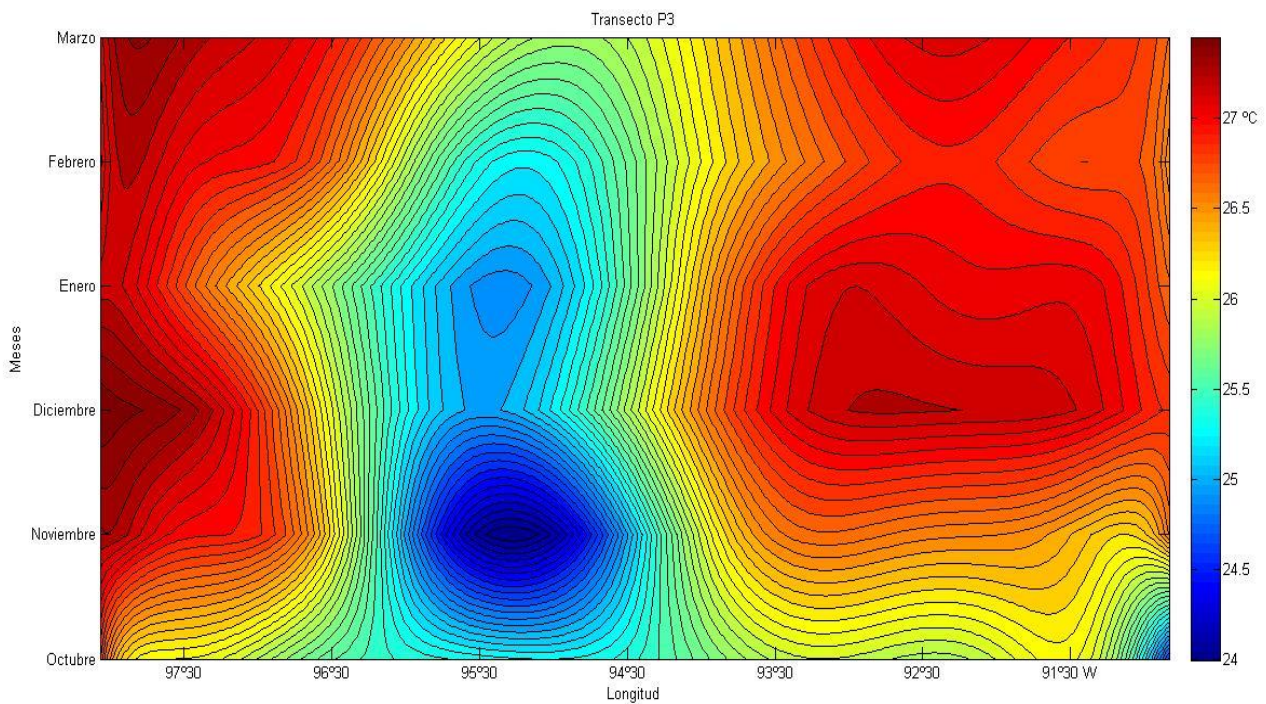


Figura 21. Meses típicos transecto P3.

En este tercer transecto paralelo a la costa y último en ser estudiado se encuentra situado a 330 km de la costa, para los meses de octubre, noviembre y presenta un gradiente térmico de $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($27\text{ }^{\circ}\text{C} - 24\text{ }^{\circ}\text{C}$) a partir de los $96^{\circ}30'$ de longitud oeste hasta poco después de los $95^{\circ}30'$. A partir de ese mismo punto el gradiente térmico cambia a ser de $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($24\text{ }^{\circ}\text{C} - 27\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta alcanzar una temperatura por arriba de los $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presentar un comportamiento más uniforme hasta el final del transecto siendo estos meses donde se observó mayor variabilidad de la TSM.

Para el resto de los meses se muestra una menor variabilidad térmica, esto puede deberse a la localización del transecto y el tiempo que ha pasado.

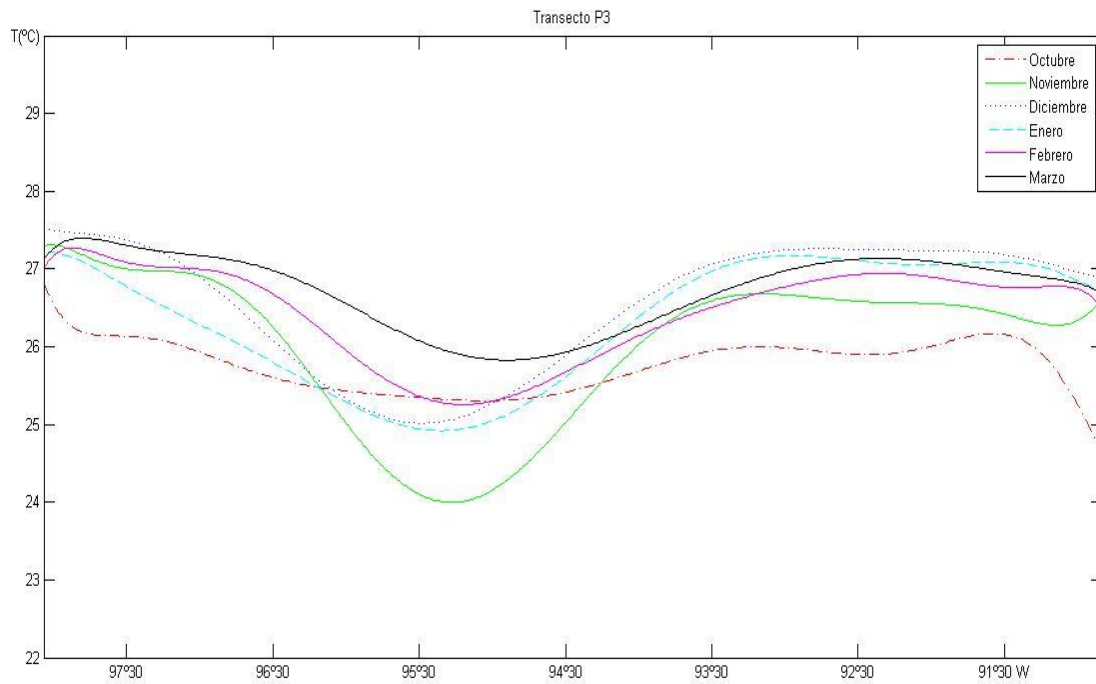


Figura 22. Transecto P3 Eje X: Longitud Eje Y: Temperatura

En la figura 22 se puede observar que la variación del gradiente térmico sigue disminuyendo, esto se puede atribuir a la localización del transecto, presentando un diámetro de acción más amplio, mayor a los 300 km. Esto puede ser debido a que, a medida que nos seguimos alejando de la costa, que es el lugar donde el efecto del Tehuano es más intenso, el efecto del Tehuano se va difuminando hasta que llega a ser imperceptible o desaparecer por completo.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones.

De acuerdo con la información usada y el uso de transectos repartidos sobre el área de estudio de una manera que se pudiera cubrir el área de acción del fenómeno “Tehuano”, se obtuvieron resultados donde se pudo observar que estos vientos intensos se presentan en temporadas frías empezando en el mes de octubre y terminando en el mes de marzo que fue el periodo que presentó una variabilidad en el gradiente térmico más notoria, teniendo una coincidencia en el tiempo con los resultados de otros estudios anteriormente realizados.

Usando la percepción remota se pudo observar que la generación de grandes remolinos de mesoescala, es debida a los fuertes vientos provenientes del norte que soplan a través de la brecha orográfica conocida como “El Paso de Chivela” provocando una disminución de la TSM en el área del Golfo de Tehuantepec.

En la mayoría de las gráficas se puede observar que los meses típicos más fríos son noviembre y febrero, presentando temperaturas mínimas cercanas a los 24 °C, esto puede ser debido a que es mayor la intensidad del Tehuano en estos meses y de acuerdo con diversos estudios es cuando la TSM alcanza sus valores mínimos para así después comenzar con su calentamiento hasta alcanzar los valores que se presentan en el resto del año.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el transecto tehuano (*figura 13*), se observó que la variabilidad de la TSM tuvo un alcance latitudinal aproximadamente de 380 km a partir de la costa y hacia mar adentro para el mes de noviembre, posteriormente disminuyo su alcance a los 220 km a partir del mes de diciembre y manteniendo ese alcance hasta el mes de febrero, y por ultimo para el mes de marzo el alcance que tuvo fue de 50 km a partir de la costa.

En las gráficas de los transectos paralelos a la costa se pueden observar que, en el transecto P1 (*figura 17*) la variabilidad de la TSM tuvo un alcance longitudinal de aproximadamente 150 km, en el transecto P2 (*figura 19*) la

variabilidad térmica generada por los Tehuanos tuvo un alcance longitudinal aproximadamente de 200 km y por último en el transecto P3 (*figura 21*) el alcance longitudinal fue mayor a los 300 km. Esto se puede interpretar como, a medida que avanzamos hacia mar adentro el efecto generado por los Tehuanos se dispersa en todas las direcciones por lo tanto de acuerdo a los resultados la variabilidad térmica es menos intensa en el transecto P3 pero con un alcance longitudinal mayor en comparación con el transecto P1.

Debido a este tipo de estudios las actividades económicas de la zona como la pesca se pueden ver beneficiadas, ya que como se mencionaba en la justificación esta variación del gradiente térmico debido a los Tehuanos y a las surgencias, trae consigo nutrientes del fondo del mar debido al afloramiento de aguas subsuperficiales de temperaturas más bajas, lo cual aumenta la producción de la ictiofauna del lugar.

5.2. Recomendaciones

Una manera de representar los resultados obtenidos para un mejor entendimiento, es hacerlo de una manera visualmente más representativa y dinámica, la cual consiste en hacer uso de la cartografía digital para el desarrollo de mapas digitales, en donde se pueda observar de manera más clara el comportamiento de la TSM en las imágenes obtenidas, para poder identificar el área de acción de los Tehuanos, así como la temporada en la que se presenta este fenómeno.

Referencias

- Aguirre Gómez, R., (2002). *Los Mares mexicanos a través de la percepción remota III.1*. Ciudad de México: Plaza Valdés S. A. de C. V.
- Andrades Rodríguez, M., & Muñoz León, C. (2012). *Fundamentos de Climatología*. Dialnet. Recuperado el 3 de octubre de 2017, Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267903>
- Brennan, M. J., Cobb III, H. D., & Knabb, R. D. (2009). *Observation of Gulf of Tehuantepec Gap Wind Events from QuikSCAT: An Updated Event Climatology and Operational Model Evaluation*. National Hurricane Center NOAA. Recuperado el 4 de noviembre de 2016 Obtenido de http://www.nhc.noaa.gov/pdf/WAF_mb_hc_rk_201004.pdf
- Castaneira Yee Ben, A. (2008). *El Paso Mareño: La interacción huave en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. (Posclásico Moderno)*. FAMSI Fundacion para el avance de los estudios Mesoamericanos. Recuperado el 10 de Octubre de 2017, Obtenido de <http://www.famsi.org/reports/06061es/index.html>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp.
- *Climatología*. INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 26 de julio de 2017. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/default.aspx>
- *Climatología de las Canarias*. GEVIC Gran Enciclopedia Virtual Islas Canarias. Recuperado el 05 de octubre del 2017. Obtenido de http://www.gevic.net/info/contenidos/mostrar_contenidos.php?idcomarca=-1&idcon=530&idcap=92&idcat=22
- Cuadrat, J. M., & Pita, M. F. (2004). *Climatología*. Madrid: Cátedra
- Farias-Salvador, M., & Castro-Avaria, C. (2008). Variabilidad de la temperatura superficial del mar, identificación de surgencias costeras y su relevancia en un área marina costera protegida del desierto de Atacama, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 41, 49-61.

- Gallegos García, A., & Barberán Falcon, J. (1998). Surgencia Eólica. En M. T. García, *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. (págs. 27-34). Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- *Importantes Procesos en el Mar Chileno. Las Surgencias*. Curso Geografía del Mar. Recuperado el 26 de julio del 2017. Obtenido de http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h72.html.
- Lein, J. K., (2012). *Environmental Sensing, Analytical Techniques for Earth Observation*. Nueva York: Springer.
- Lillesand, T.M, & Kiefer, R.W. (2000) *Remote Sensing and Image Interpretation.*, New York: John Wiley & Sons.
- Martínez Muñoz, J., (2005). *Percepción remota “Fundamentos de Teledetección Espacial”*. Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 12 de junio del 2017. Obtenido de <http://siga.conagua.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>
- Monaldo, F., (1997). *Primer on the Estimation of Sea Surface Temperature Using TeraScan Processing of NOAA AVHRR Satellite Data*. Recuperado el 14 de junio de 2017. Obtenido https://marine.rutgers.edu/cool/sat_data/Monaldo_primer.pdf.
- Nuñez Orozco, A. L., Labasatida Che, A., & Oviedo Piamonte, J. A. (2013). Composición y abundancia de la Ictiofauna en la franja sublitoral del Golfo de Tehuantepec, Oaxaca/ Chiapas, México. *Ciencia Pesquera*, 21(2), 29-40.
- Palacios, D. M., Bograd S. J. (2005). A census of Tehuantepec and Papagayo eddies in the northeaster tropical Pacific. Recuperado el 09 de abril 2018. Obtenido de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL024324>
- Pérez, D. J., (2007). *Introducción a los Sensores Remotos – Aplicaciones en Geología*. Laboratorio de Tectónica Andina, Departamento de Ciencias Geológicas. Recuperado el 14 de junio de 2017. Obtenido de http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf.

- Pleguero Orta, Carlos. (2002). Sensores Remotos y Aplicaciones en Teledetección. Geodesia y gestión de recursos naturales y patrimonio natural. Recuperado el 12 de junio del 2017. Obtenido de http://www.academia.edu/23743025/SENSORES_REMOTOS_Y_APLICACIONES_EN_TELEDETECCI%C3%93N_GEODESIA_Y_GESTI%C3%93N_DE_RECURSOS_NATURALES_Y_PATRIMONIO_NATURAL.
- Romero-Centeno, R., et. al. (2003). Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal. *Journal of Climate*, 16, 2628-2639.
- Trasviña, A., Barton, E. D. (2008). Summer circulation in the Mexican tropical Pacific. *Deep-Sea Research*, 55(1), 587-607.
- Trasviña, A., et. al. (1995). Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*, 100.
- Zamudio, L., et. al. (2006). Interannual variability of Tehuantepec eddies. *Journal of Geophysical Research*, 111(10), 20649-20663.