

Tesis defendida por
Elizabeth Andrea Gahona Ábalos
y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Gilberto Gaxiola Castro
Director del Comité

Dr. Rubén Castro Valdez
Miembro del comité

Dr. Modesto Ortiz Figueroa
Miembro del comité

Dr. Saúl Álvarez Borrego
Miembro del comité

Dra. María Lucila del Carmen Lares Reyes
Coordinador
Programa de Posgrado en Ecología Marina

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director
Dirección de Estudios de Posgrado

27 de febrero de 2013

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



Programa de Posgrado en Ciencias
en Ecología Marina

Efectos del viento Santa Ana en la biomasa y producción fitoplanctónica de la Corriente de
California frente a la Península de Baja California

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Elizabeth Andrea Gahona Ábalos

Ensenada, Baja California, México
2013

Resumen de la tesis de Elizabeth Andrea Gahona Ábalos, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Efectos del viento Santa Ana en la biomasa y producción fitoplanctónica de la Corriente de California frente a la Península de Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

En el presente estudio se demuestra el efecto del viento Santa Ana en la producción y biomasa del fitoplancton del Océano Pacífico adyacente a la Península de Baja California. Para tal fin, se utilizaron datos meteorológicos de estaciones costeras (Humedad Relativa, HR) y datos satelitales (viento, Temperatura Superficial del Mar (TSM), clorofila-a (CHL), Productividad Primaria (PP)). Los periodos estudiados fueron otoño-invierno entre 2001-2005. La mayor magnitud y extensión del viento Santa Ana hacia fuera de la costa se asociaron con las zonas de baja altitud de las montañas de California y Baja California. Al sur de 28 °N en presencia de viento Santa Ana (velocidad $> 8 \text{ m s}^{-1}$), se observaron disminuciones en la TSM e incremento de CHL y PP. A lo largo de la costa con eventos Santa Ana sucesivos se presentó disminución de la TSM ($\sim 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y un aumento de CHL y PP ($\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$, $\sim 500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente). El efecto del viento Santa Ana en la TSM, CHL y PP no fue perceptible por igual en todos los eventos. Su influencia en el océano depende de la magnitud, duración y extensión del viento. La presencia de filamentos con alta CHL y PP con dirección suroeste en especial al sur de 28 °N, indica la importancia del viento Santa Ana en la productividad de la zona oceánica debido a la advección hacia afuera de la costa de agua más productiva desde la zona costera. Se evaluó que la respuesta del océano al viento Santa Ana se presenta con surgencias de corta duración, probablemente asociadas al rotor positivo del viento, lo que contribuiría al incremento de la producción primaria y biomasa del fitoplancton en el área de influencia del viento.

Palabras Clave: viento Santa Ana, Baja California, imágenes satelitales.

Abstract of the thesis presented by Elizabeth Andrea Gahona Ábalos as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Effects of the Santa Ana wind on the biomass and phytoplanktonic production in the California Current along the Baja California Peninsula

Abstract approved by:

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

This work shows the effect of the Santa Ana wind on the phytoplankton production and biomass in the Pacific Ocean along the Baja California Peninsula. For this was used meteorological data from coastal stations (Relative Humidity, HR) and satellite data (wind, sea surface temperature (SST), chlorophyll (CHL), primary production (PP)). The studied period was autumn-winter between 2001-2005. The major magnitude and extension of the Santa Ana wind outward the coast were associated with adjacent zones of low altitude from California and Baja California mountains. At the south of 28 °N in the presence of Santa Ana wind (speed > 8 m s⁻¹), the SST decreased and CHL and PP increased. Along the coast with successive Santa Ana events during the studied period, it presented a decreased in the SST (1.5 °C) and the increased of CHL and PP (0.5 mgC m⁻² d⁻¹ and 500 mgC m⁻² d⁻¹ respectively). The effect of Santa Ana wind in the SST, CHL and PP, was not perceived the same in all the events. Its influenced in the ocean depends in the magnitude, time and extension of the wind. The presence of high CHL and PP phylaments with southeast direction, specially to the 28 °N, suggests the importance of the Santa Ana wind in the productivity of the oceanic zone due to de advection of more productive water from the coastal zone. It was estimated that the ocean responded to the Santa Ana wind with upwellings events of short periods of time, probably associated to the positive wind stress curl, which contributes to the increase of the phytoplankton primary production and biomass in the area of wind influence.

Keywords: Santa Ana wind, Baja California, satellite images.

Dedicatorias

A mis amados y pacientes padres: Adriana y Carlos

A mis hermanas: Lola, Sandra y Sole, por su apoyo y cariño incondicional

A Viki y tío Sergio, por su ejemplo de fortaleza y amor a la vida

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos y reconocimiento al Dr. Gilberto Gaxiola Castro, por permitirme trabajar con él. Por la paciencia y apoyo en el transcurso de esta tesis.

Al Dr. Rubén Castro, Dr. Modesto Ortiz y Dr. Saúl Álvarez, por aceptar ser parte de mi comité de tesis. Por su tiempo y buena disposición siempre.

A CICESE, por aceptar mi postulación a esta maestría y por brindar todo lo necesario tanto en lo académico, administrativo, como en infraestructura, para que mi estadía acá sea grata y prospera.

A CONACYT por su apoyo económico durante el desarrollo de mis estudios de maestría (Beca N° 361167). Así mismo al proyecto SEP-CONACYT (N° 129140) "Tendencias climáticas y respuestas del ecosistema pelágico de la Corriente de California frente a Baja California" por la beca de asistente que permitió terminar mi tesis.

A mi familia y amigos (Andrea, Marcela, Yalina, Nora, Lorena, Pamela, Susan, Emerson, Jaime, Gabriel, Franklin, Carlos) que a pesar de la distancia se hicieron presente siempre.

A mi querida amiga Mirayana Marcelino Barros, mi socia! Por todo lo vivido en este tiempo y por lo que vendrá. Por tu apoyo incondicional en todo aspecto. Muchas gracias Macaquinha!!

A la familia Marcelino Pereira, por aceptar ser parte de sus vidas.

A mi amigo Pablo Suarez Moo, por los encuentros y desencuentros, por las gratas conversaciones y buena compañía. Gracias por tu amistad!

A mi amiga Geovana Leon Pech, gracias querida geo por tu apoyo incondicional;

A mis amigos y compañeros de Ecología Marina: Myriam, Tannia, Raquel, Tere, Emiliano, Anita, Nancy, por los buenos momentos vividos, por el enriquecimiento mutuo tanto personal como profesional.

A mis parces del laboratorio: Eliana y Manuel!. Muchas gracias por las risas, conversaciones y desmanes hechos!

Yo sola no hubiera sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy. ¡Gracias totales!

***Gustavo Cerati
(Modificado a primera persona)***

Contenido

Resumen.....	ii
Abstract	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xiii
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Hipótesis.....	6
1.3 Objetivo General	6
1.4 Objetivos específicos.....	6
2. Materiales y Métodos	7
2.1 Área de estudio.....	7
2.2 Periodo de estudio	8
2.3 Datos meteorológicos	9
2.4 Información derivada de sensores remotos	9
2.5 Análisis espacio-temporal de los datos satelitales.....	11
2.5.1 Variación espacio-temporal en el área de estudio	11
2.5.2 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa	12
2.5.3 Variación temporal en la cuadrícula seleccionada.....	12
3. Resultados.....	13
3.1 Periodo 1: 21 septiembre de 2001- 21 de marzo de 2002	13
3.1.1 Identificación y características de viento Santa Ana	13
3.1.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio	15
3.1.3 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa	21
3.1.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada	23
3.2 Periodo 2: 21 septiembre de 2002- 21 de marzo de 2003	26
3.2.1 Determinación de las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana	26

3.2.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio	28
3.2.3 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa	33
3.2.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada	35
3.3 Periodo 3: 21 septiembre de 2003- 21 de marzo de 2004	37
3.3.1 Determinación de las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana	37
3.3.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio	39
3.3.2 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa	44
3.3.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada	46
3.4 Periodo 4: 21 septiembre de 2004- 21 de marzo de 2005	48
3.4.1 Determinación de las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana	48
3.4.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio	50
3.4.3 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa	54
3.4.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada	57
4. Discusión	59
5. Conclusiones.....	66
Referencias bibliográficas	67

Lista de Figuras

Figura 1. Área de estudio. Se indican las ubicaciones de las estaciones meteorológicas (*) y la cuadrícula utilizada en este trabajo.	7
Figura 2. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 1. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana con porcentaje de HR menores a 50%.....	13
Figura 3. Campo espacial del viento durante el periodo 1. La escala de color indica la magnitud del viento (m s^{-1}) y las flechas su dirección.....	15
Figura 4. Diferencias entre la TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0°C).....	16
Figura 5. Diferencias entre la TSM sin viento Santa Ana y la TSM promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0°C).....	16
Figura 6. Diferencias entre la CHL con viento Santa Ana y la CHL promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).	17
Figura 7. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y la CHL promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).	18
Figura 8. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y la PP promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).	18
Figura 9. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y la PP promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).....	19
Figura 10. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de TSM y CHL para las fechas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 1. S4: 16-23oct 2001; S5: 24-31oct 2001; S6: 1-8nov 2001; S9: 28nov-2dic 2001; S10: 3-10dic 2001; S11: 11-18dic 2001; S12: 19-26dic 2001; S14: 1-8ene 2002; S15: 9-16ene 2002; S16: 17-24ene 2002; S17: 25ene-1feb 2002; S18: 2-9feb 2002; S19: 10-17feb 2002; S20: 18-25feb 2002; S21: 26feb-5mar 2002.	20
Figura 11. Diagrama Hovmöller semanal-latitudinal de TSM para el periodo 1. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	21
Figura 12. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL, para el periodo 1. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	22
Figura 13. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP para el periodo 1. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	23

Figura 14. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 1 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	24
Figura 15. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 1. S9: 28nov-2dic 2001; S10: 3-10dic 2001; S11: 11-18dic 2001; S12: 19-26dic 2001; S14: 1-8ene 2002; S15: 9-16ene 2002; S16: 17-24ene 2002; S17: 25ene-1feb 2002; S18: 2-9feb 2002; S19: 10-17feb 2002; S20: 18-25feb 2002; S21: 26feb-5mar 2002.....	25
Figura 16. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 2 en las estaciones meteorológicas. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana considerando porcentaje de HR menor a 50%.	27
Figura 17. Magnitud y dirección de los vientos Santa Ana durante el periodo 2.	28
Figura 20. Diferencias entre CHL con viento Santa Ana y CHL promedio del periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).....	30
Figura 21. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y CHL promedio para el periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).	30
Figura 22. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y PP promedio del periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).....	31
Figura 23. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y PP promedio para el periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).....	31
Figura 24. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de TSM y CHL para las fechas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 2. S1= 22-29sep 2002; S2= 30sep-7oct 2002; S3= 8-15oct 2002; S7= 9-16nov 2002; S8=17-24nov 2002; S9= 28nov-2dic 2002; S11= 11-18dic 2002; S12= 19-26dic 2002; S13= 27-31dic 2002; S14= 1-8ene 2003; S15= 9-16ene 2003; S17= 25ene-1feb 2003; S18= 2-9feb 2003; S19= 10-17feb 2003.....	32
Figura 25. Diagrama Hovmöller semana-latitud de TSM, para el periodo 2. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	33
Figura 26. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL, para el periodo 2. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	34
Figura 27. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP, para el periodo 2. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	35

Figura 28. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 2 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	36
Figura 29. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 2. S7= 9-16nov 2002; S8= 17-24nov 2002; S9= 28nov-2dic 2002; S11= 11-18dic 2002; S12= 19-26dic 2002; S13=27-31dic 2002; S14= 1-8ene 2003; S15= 9-16ene 2003; S17= 25ene-1feb 2003; S18= 2-9feb 2003; S19= 10-17feb 2003.....	37
Figura 30. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 3 en las estaciones meteorológicas. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana considerando porcentaje de HR menor a 50%.	38
Figura 31. Magnitud y dirección del campo de viento durante el periodo 3.	39
Figura 32. Diferencias entre TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0°C).....	40
Figura 33. Diferencias entre TSM sin viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0°C).....	40
Figura 34. Diferencias entre CHL con viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).	41
Figura 35. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).	41
Figura 36. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$).....	42
Figura 37. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($\text{mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$).....	42
Figura 38. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de TSM y CHL para las fechas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 3. S1= 22-29sep 2003; S2= 30sep-7oct 2003; S3=8-15oct 2003; S5= 24-31oct 2001; S8= 17-24nov 2003; S9=25nov-2dic 2003; S11= 11-18dic 2003; S12= 19-26dic 2003; S13= 27-31dic 2003; S14= 1-8ene 2004; S15= 9-16ene 2004; S18= 2-9feb 2004; S19= 10-17feb 2004.	43
Figura 39. Diagrama Hovmöller semana-latitud de TSM para el periodo 3. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	44
Figura 40. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL para el periodo 3. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	45

Figura 41. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP para el periodo 3. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	46
Figura 42. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 3 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	47
Figura 43. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 3. S5= 24-31oct 2003; S8= 17-24nov 2003; S9= 28nov-2dic 2003; S11= 11-18dic 2003; S12= 19-26dic 2003; S13=27-31dic 2003; S14= 1-8ene 2004; S15= 9-16ene 2004; S18= 2-9feb 2004; S19= 10-17feb 2004.....	48
Figura 44. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 4 en las estaciones meteorológicas. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana considerando porcentaje de HR menor a 50%.	49
Figura 45. Campo del viento durante el periodo 4. La escala de color indica magnitud del viento (m s^{-1}).	50
Figura 46. Diferencias entre TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 4.	51
Figura 47. Diferencias entre TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 4.	51
Figura 48. Diferencias entre CHL con viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 4.	52
Figura 49. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 4.	52
Figura 50. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 4.	53
Figura 51. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 4.	53
Figura 52. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de CHL y TSM para las semanas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 4. S2= 29sep-6oct 2004; S3=7-14oct 2004; S4= 15-22oct 2004; S6= 31oct-7nov 2004; S9=24nov-1dic 2004; S11= 10-17dic 2004; S12= 18-25dic 2004; S16= 17-24ene 2005; S18= 2-9feb 2005.	54
Figura 53. Diagrama Hovmöller semana-latitud de TSM, para el periodo 4. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	55
Figura 54. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL, para el periodo 4. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día	

medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.	56
Figura 55. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP, para el periodo 4. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	56
Figura 56. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 4 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.....	57
Figura 57. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 4. S6= 31-7nov 2004; S9= 24nov-1dic 2004; S11= 10-17dic 2004; S12= 18-25dic 2004; S16= 17-24ene 2005; S18= 2-9feb 2005.....	58
Figura 58. Índice Multivariado ENSO (MEI) para el periodo de estudio (2001-2005). Valores positivos indican condición El Niño y valores negativos condición La Niña. http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/mei.html	60

Lista de Tablas

Tabla 1. Fechas correspondientes a cada periodo estudiado.....	9
Tabla 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la Península de Baja California.....	9
Tabla 3. Características generales de los datos satélites empleados en este estudio.....	10
Tabla 4. Número de pixeles utilizados según el sensor para la elaboración de los diagramas Hovmöller.	12
Tabla 5. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 1.....	14
Tabla 6. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; prom= promedio; error=error estándar.....	20
Tabla 7. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 1. ns= número de semanas; n= número de datos; prom= promedio; error= error estándar.....	26
Tabla 8. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 2.....	27
Tabla 9. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; prom= promedio; error=error estándar.....	32
Tabla 10. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 2. ns= número de semanas; número de datos; prom= promedio; error= error estándar.	37
Tabla 11. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 3.....	38
Tabla 12. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; n= número de datos; prom= promedio; error=error estándar.	44
Tabla 13. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 3. ns= número de semanas; número de datos; prom= promedio; error= error estándar.....	48
Tabla 14. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 4.....	50
Tabla 15. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; n= número de datos; prom= promedio; error=error estándar.	54
Tabla 16. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del	

periodo 4. ns= número de semanas; número de datos; prom= promedio; error= error estándar.	58
---	----

1. Introducción

La circulación atmosférica en el Océano Pacífico Norte está dominada principalmente por el Centro de Alta Presión (CAP), ubicado aproximadamente a 30°N y 140°W (Amador *et al.*, 2006). Frente a las costas de California y Baja California, la migración estacional del CAP origina fuertes gradientes de presión que producen generalmente vientos hacia el ecuador durante todo el año (Trenberth *et al.*, 1990; Durazo, 2009; Castro y Martínez, 2010). Estos vientos influyen sobre el flujo neto de la Corriente de California hacia el ecuador y beneficia la producción del océano, ya que cuando soplan en forma paralela a la costa provocan transporte de Ekman que favorece la generación de surgencias costeras. Aunado a lo anterior, la presencia de rotacional del esfuerzo del viento positivo frente a la costa favorece el bombeo de aguas subsuperficiales, por ende contribuye a la productividad biológica (Castro y Martínez, 2010).

En otoño-invierno en algunas ocasiones se observa una diferencia de presión atmosférica entre el CAP que se posiciona sobre el continente norteamericano aproximadamente en la Gran Cuenca y un sistema de baja presión débil localizado costa afuera en el sur de California, originándose la condición climática conocida como “Santa Ana” (Raphael, 2003). La presencia de esta condición se caracteriza por presentar aumento en la temperatura ambiental, disminución de la humedad relativa del aire, aumento en la magnitud y cambio en la dirección del viento (Fovell, 2002; Castro *et al.*, 2003; Raphael, 2003; Castro *et al.*, 2006). El viento Santa Ana se dirige desde el continente hacia el mar y se extiende sobre el sur de California y la Península de Baja California, alcanzando incluso cientos de kilómetros costa afuera. La velocidad del viento bajo condiciones Santa Ana puede aumentar hasta en cinco veces con un cambio de 2.4 m s^{-1} en condiciones normales a 10 m s^{-1} en condiciones Santa Ana; Castro *et al.* (2006). Los vientos Santa Ana tienen una duración promedio de 1.5 días y pueden presentarse hasta 20 veces durante el año (Raphael, 2003). Estos vientos provenientes del continente desplazan gran cantidad de material particulado originado en los desiertos de Mojave y Sonora. Se ha considerado que la orografía juega un papel importante en la velocidad y extensión que adquiere el viento

(Sommers, 1978; Fovell, 2002; Castro *et al.*, 2003; Hu y Liu, 2003; Raphael, 2003; Trasviña *et al.*, 2003; Castro *et al.*, 2006; Ortiz-Figueroa, 2009).

El viento Santa Ana está asociado a factores como el favorecimiento y extensión de incendios, alergias, caídas de árboles, etc., pero dependiendo de su magnitud, duración y extensión hacia el océano también puede afectar las corrientes superficiales, el intercambio de calor atmósfera-océano, la incorporación de polvo a la superficie del mar, surgencias, entre otros (Castro *et al.*, 2006). Dentro de los efectos del viento Santa Ana al sistema pelágico destaca el aumento en la concentración de clorofila-*a* (Trasviña y Barton, 1997; Hu y Liu, 2003; Sosa-Ávalos *et al.*, 2005; Castro *et al.*, 2006; Sosa-Ávalos *et al.*, 2010), lo que mantendría el soporte alimenticio para el nivel trófico secundario cuando las surgencias costeras no son intensas (otoño-invierno), aunque los niveles productivos de éstas no son comparables ya que el viento Santa Ana es de corta duración (Trasviña *et al.*, 2003). Aunado a las surgencias por efecto del viento Santa Ana está la posible fertilización del océano producto del aporte de material particulado proveniente de los desiertos (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Ortiz-Figueroa, 2009), el cual podría proveer algunos nutrientes limitantes como el hierro, favoreciendo el aumento en la concentración de clorofila-*a*. Este aspecto no ha sido estudiado en la Corriente de California, ya que sólo se ha estimado la extensión de la nube de material particulado en el océano a través de imágenes satelitales en color verdadero (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/image_archive.cgi?c=DUST). Sin embargo, Sosa-Ávalos *et al.* (2005) encontraron un aumento en la concentración de detritos en muestras de agua superficial asociada al transporte eólico de partículas inorgánicas por viento Santa Ana. Otra consecuencia en el océano adyacente al sur de California y Península de Baja California debido al viento Santa Ana es que puede producir mezcla vertical y por lo tanto disminución de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) (Hu y Liu, 2003).

La utilización de imágenes satelitales en estudios científicos ha ido en aumento en las últimas décadas debido a los beneficios que éstas otorgan, entre los que se destacan: mayor cobertura espacial y temporal, bajos costos, fácil adquisición de los datos y la variedad de productos generados. En estudios de interacción físico-biológica en el océano la

adquisición de variables como clorofila-*a*, TSM, vientos, nivel del mar, batimetría, etc., han sido de vital importancia para el conocimiento científico. Sin embargo, existen limitaciones en el trabajo con imágenes satelitales debido a que la cobertura de nubes afecta directamente en la adquisición de la información satelital de sensores pasivos. Por ejemplo, las imágenes diarias de concentración de clorofila-*a* no siempre son óptimas para trabajar. Además, hay que tener cuidado al determinar el área de estudio ya que la mayoría de los sensores no tienen buena resolución cerca de la costa.

Los estudios relacionados con viento Santa Ana se han enfocado en general en su descripción y/o en estimar la respuesta del océano a este fenómeno. Sin embargo, en estos últimos el periodo de estudio sólo cubre un evento (Castro *et al.*, 2003; Hu y Liu, 2003; Trasviña *et al.*, 2003), situación que no permite establecer de manera general las consecuencias de este viento en la superficie del océano adyacente. Debido a la facilidad de contar con una amplia base de datos satelitales de diversas variables, este trabajo está enfocado en determinar los efectos del viento Santa Ana frente a la Península de Baja California por un periodo de cinco años, a través de cambios en la TSM y estimaciones de clorofila-*a* satelital (CHL) y Producción Primaria (PP).

1.1 Antecedentes

Las características generales de la condición Santa Ana son aumento del gradiente de presión atmosférica entre la región de la Gran Cuenca (Estados Unidos) y frente a las costas de California (Estados Unidos) y Baja California (México), aumento de temperatura ambiental, disminución de la humedad relativa, cambio en la dirección (hacia el mar) e intensidad del viento y cielos despejados (Sommers, 1978; Lynn y Svejksky, 1984; Raphael, 2003). La influencia espacial de esta condición es desde la Gran Cuenca (al oeste de Estados Unidos) hasta frente a la Península de Baja California (México).

Uno de los trabajos más completo de eventos Santa Ana es el realizado por Raphael (2003) en el cual analizó cartas sinópticas diarias de 1968 a 2000, de las que se obtuvo velocidad y dirección del viento, fecha y número de días por evento, temperatura de rocío, temperatura del aire, localización y extensión de los centros de presión. Los resultados estadísticos

establecieron que los eventos Santa Ana están limitados al periodo septiembre-abril, con la mayor frecuencia en diciembre. El promedio de eventos por año fue de 20 y el promedio de duración de cada evento de 1.5 días, observándose una disminución durante El Niño a 15 eventos por año y duración promedio de 1.8 días. En cuanto a la humedad relativa no se estableció un valor característico ya que los resultados no fueron uniformes.

Mensing *et al.* (1999) reconstituyeron una serie de tiempo de 560 años (de 1425 a 1985) a través de depósitos sedimentarios de la Cuenca de Santa Bárbara, con el fin de establecer la relación entre los incendios ocurridos durante condición Santa Ana y el tamaño del carbón depositado, encontraron que el carbón de mayor tamaño ($> 3750 \mu\text{m}^2$) estuvo asociado a fuertes incendios ocurridos durante eventos Santa Ana. El favorecimiento de incendios en condición Santa Ana se puede explicar por la combinación de masa de aire más seca y caliente y el tipo de vegetación en la región del sur de California. La relación entre los fuertes incendios y los eventos Santa Ana (Svejkovsky, 1985; Westerling *et al.*, 2004; Bytnerowicz *et al.*, 2010) ha incentivado la creación de diversos modelos atmosféricos que permitan predecir los eventos con el fin de contribuir a la prevención de incendios (Hu y Liu, 2003; Conil y Hall, 2006; Hughes y Hall, 2010).

La ocurrencia de un evento Santa Ana también facilita la obtención de imágenes satelitales diarias de polvo y/o humo y estimar variables como CHL y TSM, ya que el viento proveniente del noreste transporta las nubes hacia fuera de la costa lo que permite obtener imágenes de la zona afectada por los vientos. Lyn y Svejkovsky (1984) evaluaron dos algoritmos para calcular TSM a partir de la condición de cielo despejado que brinda el viento Santa Ana. La determinación de la extensión del viento Santa Ana sobre el océano también ha sido posible a través de imágenes satelitales, observándose su influencia hasta 100 y 1000 km fuera de la costa (Svejkovsky, 1985; Castro *et al.*, 2003; Hu y Liu, 2003; Trasviña *et al.*, 2003).

A través de datos satelitales de clorofila-*a*, TSM y viento se han observado filamentos de clorofila-*a* y TSM asociados a la presencia de viento Santa Ana entre 26-28 °N, 30-31 °N. Los cambios observados entre estos filamentos y las aguas de alrededor, fue disminución de

TSM de $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ (Trasviña *et al.*, 2003) y aumento en la clorofila-*a* de $\sim 2 \text{ mg m}^{-3}$ (Castro *et al.*, 2006). La presencia de los filamentos coincidió con el paso libre del viento debido a la disminución de la altura de las montañas (Castro *et al.* 2003; Hu y Liu 2003; Trasviña *et al.* 2003; Castro *et al.* 2006).

Los cambios en la concentración de clorofila-*a* y TSM, a consecuencia de viento Santa Ana, fueron explicados por mezcla vertical (Hu y Liu 2003) y por bombeo de Ekman positivo (Trasviña *et al.* 2003), lo que favorecería el crecimiento de fitoplancton y por consiguiente el aumento en la biomasa. Una respuesta similar en el océano es registrada como efecto de fuertes vientos del norte en el Pacífico Oriental Tropical, en las zonas del Golfo de Tehuantepec (México), Golfo de Papagayo (Nicaragua) y Golfo de Panamá (Panamá) (McCreary *et al.*, 1989; Trasviña y Barton, 1997; Chelton *et al.*, 2000; Barton *et al.*, 2009).

La relevancia de estudiar esta condición atmosférica en más de un evento, especialmente el efecto del viento Santa Ana, es verificar si éste tiene como respuesta en el océano eventos de surgencias costeras de vida corta que favorecen la producción fitoplanctónica durante otoño-invierno frente a la Península de Baja California (Trasviña *et al.*, 2003).

1.2 Hipótesis

El viento Santa Ana incrementa la clorofila-*a* en la capa superficial del océano, genera una mayor producción primaria y disminuye la temperatura superficial del mar frente a la Península de Baja California.

1.3 Objetivo General

Determinar el efecto del viento Santa Ana en la concentración de clorofila-*a*, producción primaria y temperatura superficial del mar frente a la Península de Baja California.

1.4 Objetivos específicos

Identificar y caracterizar los eventos de viento Santa Ana a través de datos meteorológicos y satelitales, durante septiembre de 2001 a marzo de 2005.

Describir la variabilidad espacio-temporal de TSM, CHL y PP.

Determinar el grado de asociación entre la TSM, CHL y el viento Santa Ana.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la zona comprendida entre 22.5-34.0 °N y 110.0-120.0 °W (Fig.1), la cual está localizada en la parte sur del Sistema de la Corriente de California (SCC), específicamente en la Corriente de California (CC) frente al sur de California y la Península de Baja California. La CC presenta flujo neto hacia el ecuador y se caracteriza por ser muy productiva como resultado de vientos favorables (norte-noroeste) para surgencias costeras, provocando máximos de clorofila-*a* especialmente en primavera (Carr y Kearns, 2003). La variabilidad termohalina y el patrón de corrientes en el área de estudio son influenciados por los cambios estacionales (Durazo *et al.*, 2010).

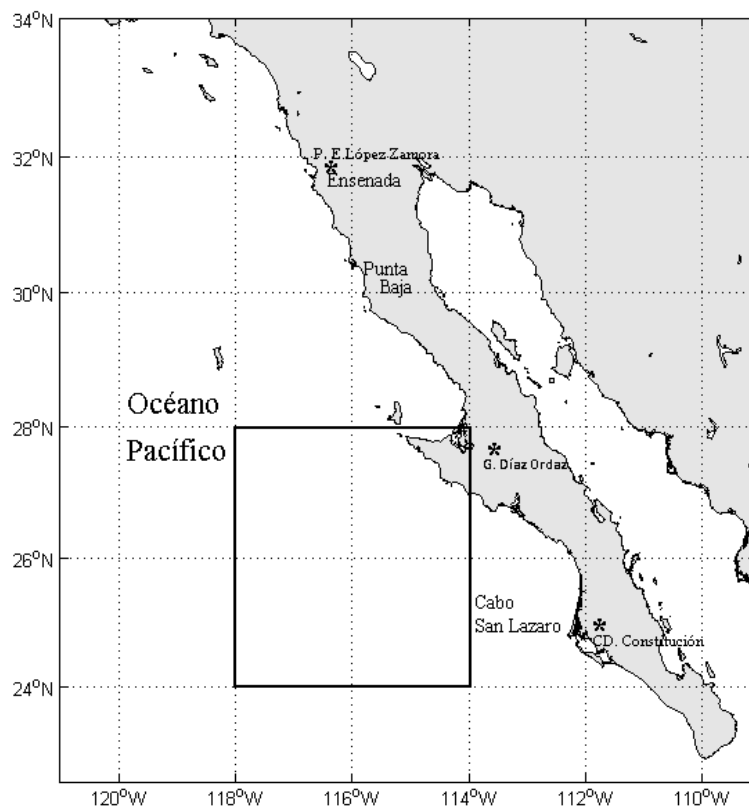


Figura 1. Área de estudio. Se indican las ubicaciones de las estaciones meteorológicas (*) y la cuadrícula utilizada en este trabajo.

A partir de los promedios estacionales de temperatura y salinidad frente a Baja California, Durazo *et al.* (2010) definieron dos provincias al norte y al sur de Punta Eugenia. La región norte se caracterizó superficialmente por el dominio de agua Subártica y la presencia de surgencias costeras durante todo el año. La región sur fue dominada superficialmente por la presencia de agua tropical y subtropical, cálidas y más salinas, con surgencias evidentes en esta región en primavera y verano. Gaxiola-Castro *et al.* (2010) tomando en cuenta datos in situ y satelitales de concentración de clorofila-*a* y producción primaria, identificaron tres regiones tróficas: una eutrófica cercana a la costa con concentraciones de clorofila-*a* $>1.0 \text{ mg m}^{-3}$, una mesotrófica entre las zonas costeras y oceánicas con valores de clorofila- *a* entre $\geq 0.25 \text{ mg m}^{-3}$ y $\leq 1.0 \text{ mg m}^{-3}$ y una tercera oligotrófica en la zona oceánica con concentraciones de clorofila-*a* $< 0.25 \text{ mg m}^{-3}$. La media de la producción primaria fue de $128 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $69 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $49 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para las tres diferentes regiones, respectivamente. La amplitud y permanencia de estas regiones dependen de los procesos presentes en cada zona. Por ejemplo surgencias costeras, ciclo El Niño-La Niña y los cambios en la dirección e intensidad del flujo de la Corriente de California.

En general, los vientos en la zona de estudio presentan dirección predominante hacia el sureste, siendo más intensos durante primavera-verano influyendo directamente en el flujo de la Corriente de California y en la generación de surgencias costeras (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Castro y Martínez, 2010). En otoño-invierno destaca la presencia de viento Santa Ana, que se caracterizan por presentar dirección hacia el suroeste-oeste, con condiciones cálidas, secas y de corta duración (1-2 días), el cual se puede observar desde el sur de California hasta el sur de la Península de Baja California. La topografía de ambas regiones influye en la extensión espacial del viento, facilitando el paso de éste al océano próximo en zonas de baja altitud.

2.2 Periodo de estudio

En este trabajo se estudia el efecto de los vientos Santa Ana durante otoño- invierno de los años 2001 al 2005, debido a que en estas estaciones se presentan mayormente los eventos

(Raphael, 2003). De acuerdo a lo anterior, se definieron cuatro periodos de estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Fechas correspondientes a cada periodo estudiado.

Periodo	Rango de fechas
1	21 septiembre 2001 al 21 marzo 2002
2	21 septiembre 2002 al 21 marzo 2003
3	21 septiembre 2003 al 21 marzo 2004
4	21 septiembre 2004 al 21 marzo 2005

2.3 Datos meteorológicos

Para identificar los eventos Santa Ana se utilizaron los datos de Humedad Relativa (HR) (%) de tres estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Fig.1, Tabla 2). Se consideró la HR como el parámetro indicador de condición Santa Ana según lo sugerido por Castro *et al.* (2006). El criterio de identificación fueron las fechas donde hubo baja HR ($< 50\%$) y cuando visualmente los datos de viento satelital indicaron dirección hacia el oeste. Los datos de HR fueron proporcionados por la oficina de Pronóstico Meteorológico de CICESE.

Tabla 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la Península de Baja California.

Estación meteorológica	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Presa Emilio López Zamora	31°53'29''	116°36'12''	32
Gustavo Díaz Ordaz	28°38'34''	113°27'27''	37
Ciudad Constitución	25°00'35''	111°39'48''	28

Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/emas/EMASK.html>

2.4 Información derivada de sensores remotos

Para este estudio se consideraron datos satelitales de viento, TSM, CHL y PP (Tabla 3), los cuales fueron descargados en formato HDF (Hierarchical Data Format) con nivel 3 de procesamiento, lo que significa que vienen con el menor ruido y error posible. Los datos utilizados correspondieron al mismo periodo que los datos meteorológicos. Después de la

descarga de las imágenes globales se aplicaron las ecuaciones propuestas en los metadatos para transformar de número digital a valores.

Tabla 3. Características generales de los datos satélites empleados en este estudio.

Variable	Sensor	Resolución Espacial	Sitio de descarga
viento	QuickSCAT	0.5 ° x 0.5 °	http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/index.cfm
CHL PP	SeaWiFS	9km x 9km	http://oce&ata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/MaPPed/8Day/9km/chlor http://orca.science.oregonstate.edu/1080.by.2160.8day.hdf.vgpm.s.chl.a.sst.php
	MODIS-Aqua	4km x 4km	http://oce&ata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/Mapped/8Day/9km/chlor/ http://orca.science.oregonstate.edu/1080.by.2160.8day.hdf.vgpm.m.chl.m.sst4.php
TSM	AVHRR	4km x 4km	http://www.nodc.noaa.gov/sog/pathfinder4km/userguide.html

La información del viento se obtuvo del satélite QuikSCAT con resolución temporal diaria y espacial de 0.5 ° x 0.5 °. Se utilizaron los datos correspondientes a las componentes zonal (u, dirección este-oeste) y meridional (v, dirección norte-sur) del viento, con las que se calculó la magnitud. Posteriormente se realizaron gráficas vectoriales con las cuales se verificó la presencia de vientos Santa Ana, además de la extensión y duración de éstos.

Los datos de TSM fueron obtenidos del sensor AVHRR, utilizándose imágenes diurnas y nocturnas correspondientes a los compuestos de ocho días. Se realizó una inspección visual de cada imagen de la TSM para verificar el procesamiento y descartar aquellas que estuvieran fuera del intervalo de temperatura característico de la zona, <10 °C y >28 °C . Después, se procedió a promediar las imágenes diurna y nocturna obteniéndose una imagen por fecha de adquisición.

Los datos de clorofila-*a* (CHL) fueron obtenidos de los sensores SeaWiFS y MODIS-Aqua para los períodos diciembre 2001-marzo 2002 y diciembre 2002-marzo 2005, respectivamente. Las imágenes utilizadas corresponden al promedio de ocho días. En cada imagen de CHL se descartaron los valores menores a 0.1 mg m^{-3} y los mayores a 10 mg m^{-3} (OMM, 2012). Los datos de estimación de PP utilizados se basan en el Modelo de Productividad Vertical Generalizado propuesto por Behrenfeld y Falkowskil (1997), cuya ecuación entrega como resultado la estimación de PP en la zona eufótica ($\text{PP, mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

2.5 Análisis espacio-temporal de los datos satelitales

Una vez identificados los días en que ocurrió viento Santa Ana frente a Baja California se procedió a acoplarlos con las fechas de las imágenes a utilizar (Tabla 3). Se realizaron tres análisis para determinar la variación espacio-temporal de CHL, PP y TSM por efectos de viento Santa Ana. El primero consideró toda el área de estudio, el segundo la variación a lo largo de la costa y el tercer análisis tomó en cuenta la variación en el tiempo en una cuadrícula seleccionada (Fig. 1).

2.5.1 Variación espacio-temporal en el área de estudio

El primer análisis consistió en restarle a cada imagen el promedio de todas las imágenes de TSM correspondientes al periodo de estudio, para así poder observar donde hubo aumento o disminución de TSM en el área de estudio respecto al promedio. Además, se consideraron fechas donde no se observó la presencia de viento Santa Ana (principios de cada periodo de estudio) para verificar diferencia o semejanza con las imágenes con presencia de viento Santa. Este mismo procedimiento se realizó para CHL y PP.

Se realizó análisis de conglomerado con los datos promediados de TSM y CHL, con el objetivo de observar si las semanas con y sin viento Santa Ana resultaban asociadas en distintos grupos. El análisis de conglomerados es una técnica multivariada que tiene el propósito de agrupar de acuerdo a la similitud de los datos.

Para establecer que grado de asociación existe entre TSM y CHL se realizó una matriz de correlación entre las variables.

2.5.2 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa

Para observar la variabilidad espacio-temporal a lo largo de la costa se construyeron diagramas Hovmöller. Para ello se consideraron los promedios de TSM, CHL y PP de pixeles cercanos a la costa (~45 km). El número de pixeles dependió del sensor del cual se descargaron los datos, ya que tienen diferente resolución espacial (Tabla 4). En los diagramas se consideró la variable tiempo (semanas) en el eje x y latitud en el eje y.

Tabla 4. Número de pixeles utilizados según el sensor para la elaboración de los diagramas Hovmöller.

Sensor	SeaWiFS	MODIS_Aqua	AVHRR
Número de pixeles utilizados	5	10	10

2.5.3 Variación temporal en la cuadrícula seleccionada

La cuadrícula (24-28 °N; 114-118 °W) se seleccionó considerando los resultados de Castro et al. (2003) quienes delimitaron el área de mayor influencia del viento Santa Ana según la variación de la velocidad del viento y el área donde se observaron las máximas magnitudes en las imágenes de viento satelital de este estudio. Se obtuvieron gráficas que permitieron distinguir la variación temporal del promedio de TSM, CHL y PP en la cuadrícula.

Se efectuó análisis de conglomerado para las fechas con presencia de viento Santa Ana para poder observar diferencias entre ellas. Para establecer el grado de asociación entre TSM y CHL se realizó una matriz de correlación entre las variables.

3. Resultados

3.1 Periodo 1: 21 septiembre de 2001- 21 de marzo de 2002

3.1.1 Identificación y características de viento Santa Ana

Los valores de HR menores a 50% se presentaron desde finales de noviembre hasta principios de marzo en las tres estaciones meteorológicas seleccionadas (Fig. 2). En las estaciones ubicadas en Ensenada y Gustavo Díaz Ordaz (Fig. 1), norte y centro del área de estudio respectivamente, se registraron variaciones mayores de HR que en la estación ubicada en el sur (Ciudad Constitución). En ésta última la HR no alcanzó porcentajes menores a 20%, mientras que en las estaciones norte y centro los valores mínimos de HR llegaron a 10%.

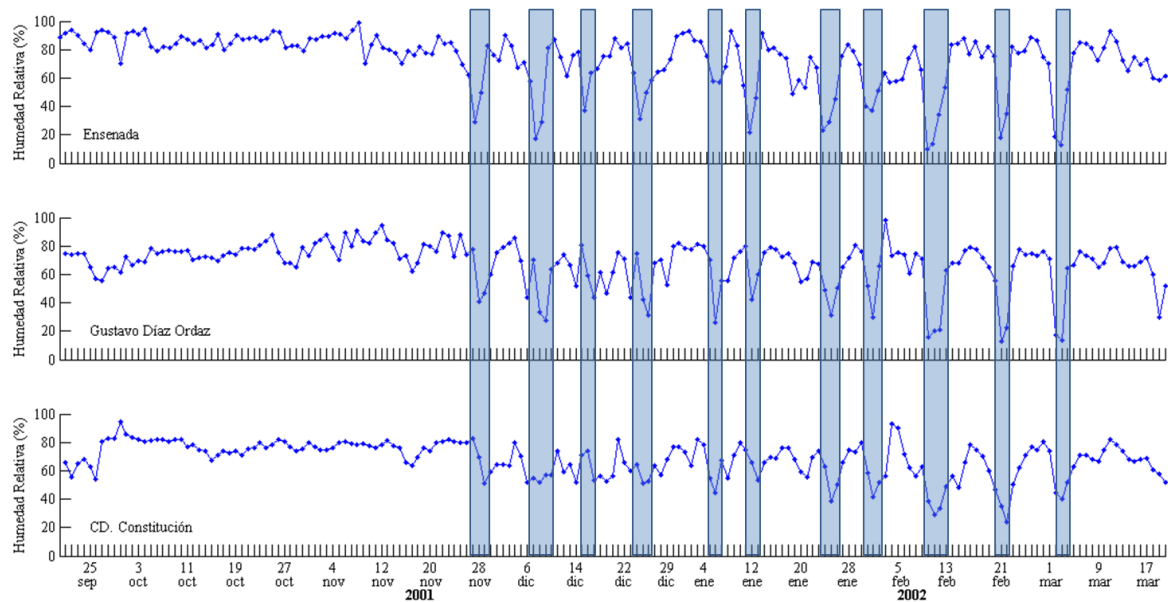


Figura 2. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 1. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana con porcentaje de HR menores a 50%.

Considerando las fechas donde la HR fue menor a 50% (Fig. 2) y cuando el viento presentó dirección proveniente del primer cuadrante (Fig. 3), se cuantificaron 11 eventos Santa Ana para el periodo 1, con una duración de entre uno y cuatro días. La duración máxima fue del

31 de enero y el 3 de febrero del 2002 (Tabla 5), con enero como el mes con mayor número de eventos.

La equivalencia entre las fechas donde la HR fue menor a 50%, presencia de viento Santa Ana y las imágenes satelitales utilizadas se muestran en la Tabla 5. En general, hubo relación entre cada evento y la fecha de las imágenes, excepto en el evento ocho donde se dividió en dos imágenes.

Tabla 5. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 1.

Eventos Santa Ana	Fechas HR <50%	Fechas de viento Santa Ana	Fechas imágenes satelitales (TSM, CHL y PP)
1	28 nov 2001	28-29 nov 2001	25 nov-2dic 2001
2	8-9 dic 2001	8 dic 2001	3-10 dic 2001
3	16 dic 2001	16-17 dic 2001	11-18 dic 2001
4	25 dic 2001	25 dic 2001	19-26 dic 2001
5	5 ene 2002	5-6 ene 2002	1-8 ene 2002
6	12 ene 2002	12 ene 2002	9-16 ene 2002
7	24-26 ene 2002	24-25 ene 2002	17-24ene 2002
8	31 ene-2 feb 2002	31 ene-3 feb 2002	25 ene-1 feb 2002
			2-9 feb 2002
9	10-12 feb 2002	10-11 feb 2002	10-17 feb 2002
10	21-22 feb 2002	22 feb 2002	18-25 feb 2002
11	2-3 mar 2002	3 mar 2002	26 feb-5 mar 2002

La dirección del viento hacia el oeste-suroeste asociado a eventos Santa Ana fue perceptible en toda el área de estudio aunque no de manera homogénea. Por ejemplo el 12 de enero y 22 de febrero de 2002 el viento hacia el suroeste fue perceptible entre 26-27 °N y 113-114 °W. Sin embargo, en general fue notorio al sur de 28 °N durante el periodo estudiado. La mayor cobertura espacial se observó el 24 de enero, 10 y 11 de febrero de

2002, con la máxima extensión de ~ 900 km desde Punta Eugenia ($\sim 28^\circ\text{N}$) hasta 22.5°N - 120°W (en dirección suroeste). Las magnitudes del viento fueron espacial y temporalmente variables, con las máximas magnitudes ($8\text{-}13\text{ m s}^{-1}$) entre 22.5°N - 28°N y 113°W - 120°W a mediados de diciembre de 2002 y desde finales de enero a mediados de febrero del mismo año. Las menores magnitudes ($1\text{-}2.5\text{ m s}^{-1}$) estuvieron restringidas al norte del área de estudio ($32\text{-}34^\circ\text{N}$; 117.5°W - 120°W), principalmente durante febrero y principios de marzo de 2002 (Fig. 3).

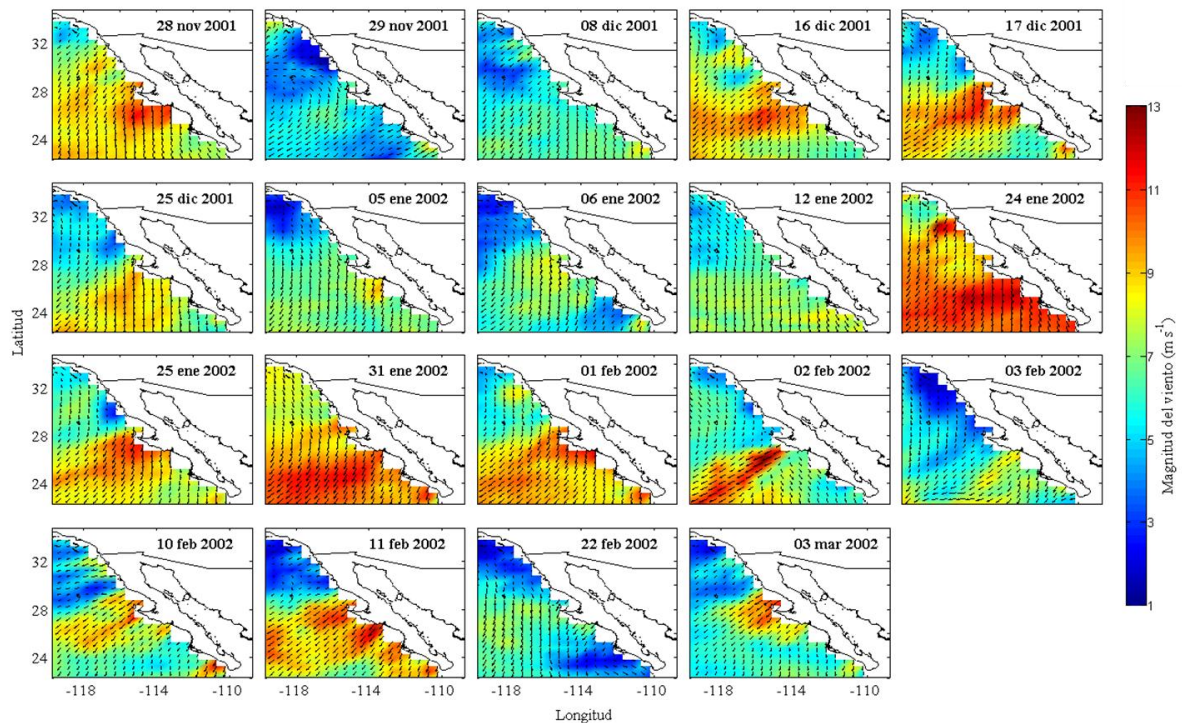


Figura 3. Campo espacial del viento durante el periodo 1. La escala de color indica la magnitud del viento (m s^{-1}) y las flechas su dirección.

3.1.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio

La variabilidad espacio-temporal de la TSM en el área de estudio para fechas con y sin viento Santa Ana se presentan en las figuras 4 y 5, respectivamente. La diferencia entre cada imagen de TSM y el promedio del periodo 1 en presencia de viento Santa Ana fue variable espacial y temporalmente (Fig. 4), con valores positivos (diferencias $> 1.0^\circ\text{C}$) en casi toda el área de estudio en las primeras imágenes (25nov-2dic 01 y 3-10dic 01). Desde

mediados de diciembre de 2001 a mediados de enero de 2002 se observó una transición en los valores de las diferencias de TSM, las que variaron entre 1.0 y -1.0 °C, con diferencias positivas asociadas a la zona oceánica y las negativas a la zona costera. Desde la imagen del 25ene-1feb 2002 hacia adelante las diferencias negativas (-0.5 a -3.0 °C) fueron observadas en la mayor parte del área de estudio, lo que indica que la TSM de estas imágenes es menor que la TSM promedio del periodo 1. Las diferencias negativas de ~ -2.5 °C se presentaron entre 22.5-28 °N desde la costa hasta ~ 115 °W.

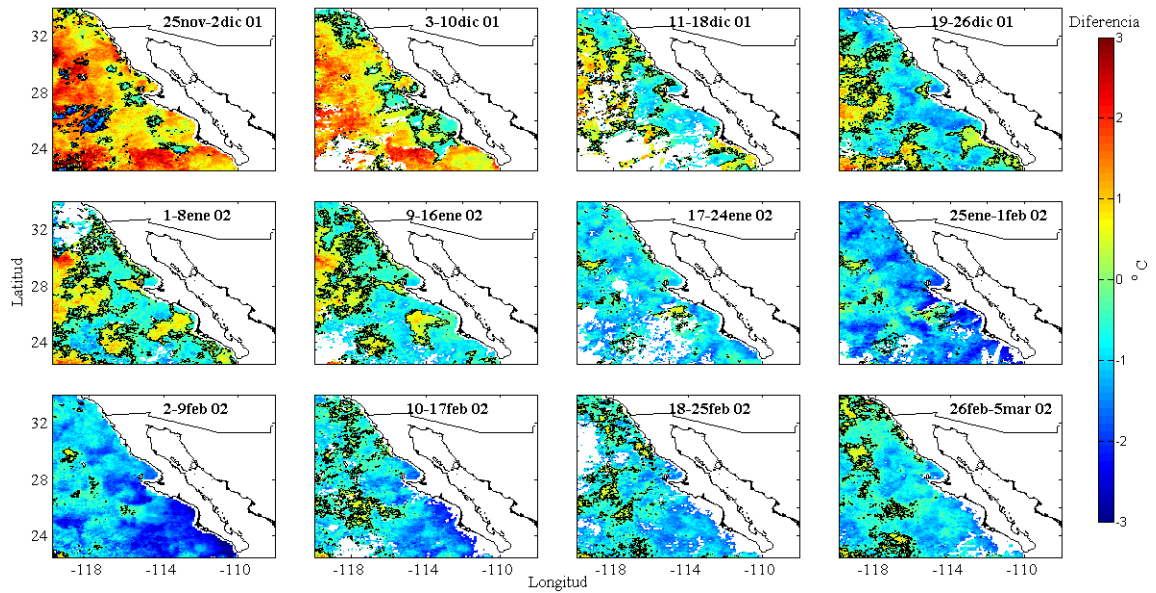


Figura 4. Diferencias entre la TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 °C).

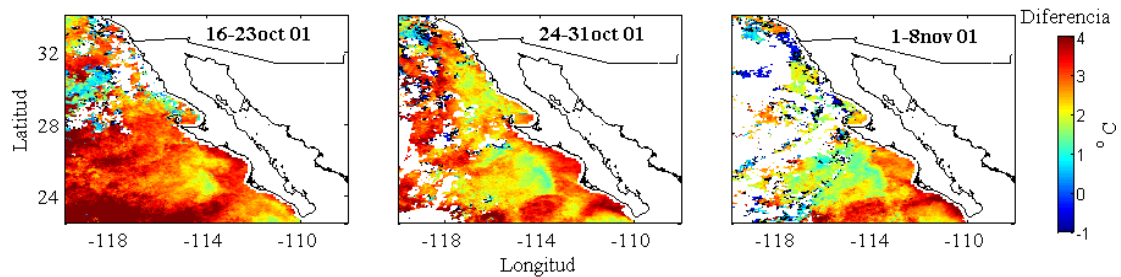


Figura 5. Diferencias entre la TSM sin viento Santa Ana y la TSM promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 °C).

En general, en las fechas sin viento Santa Ana se observaron diferencias positivas en toda el área de estudio, lo que indica que la TSM en estas fechas es mayor que la TSM promedio (Fig. 5).

Las figuras 6 y 7 muestran la variabilidad CHL en el área de estudio para fechas con y sin ocurrencia de viento Santa Ana, respectivamente. Las diferencias positivas indican aumento en CHL en cada fecha respecto al promedio de CHL para periodo 1 y las diferencias negativas su disminución.

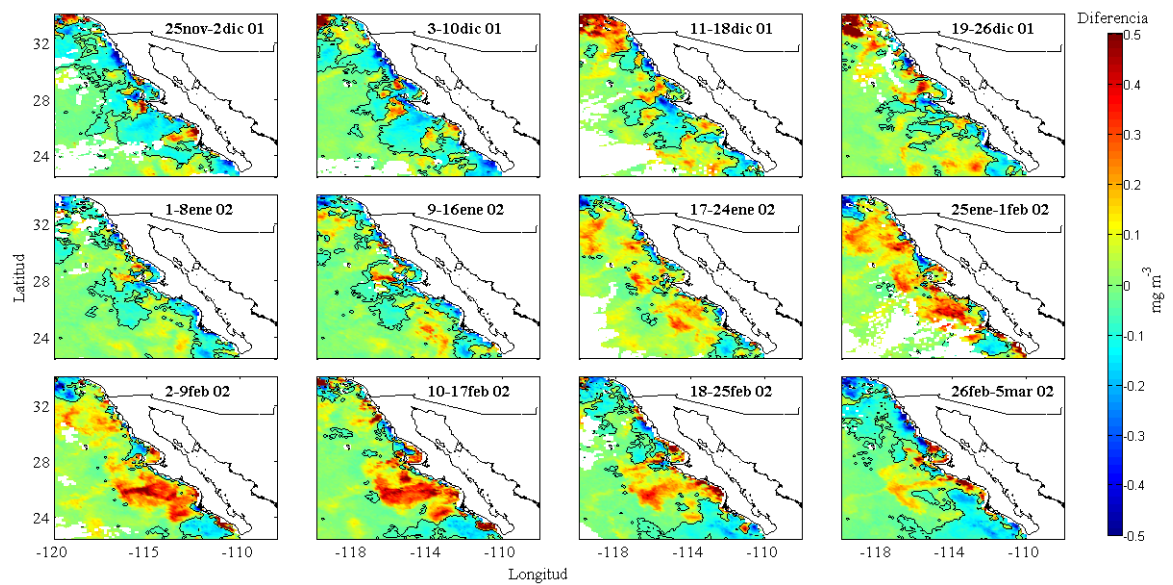


Figura 6. Diferencias entre la CHL con viento Santa Ana y la CHL promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).

En presencia de viento Santa Ana (Fig. 6), la CHL en general presentó diferencias negativas asociadas a una franja paralela a la costa ($\sim -0.2 \text{ mg m}^{-3}$) y presencia de diferencias positivas en la zona oceánica ($\sim 0.2 \text{ mg m}^{-3}$). En diciembre 2001 las diferencias mayores a 0.3 mg m^{-3} se ubicaron sobre 32°N . En las imágenes 25ene-1feb 02 y 2-9feb 02, se observó mayor cobertura espacial de las diferencias positivas ($> 0.2 \text{ mg m}^{-3}$). A partir de estas fechas las diferencias mayores a 0.2 mg m^{-3} se centraron entre $24-28^\circ\text{N}$ desde la zona costera hasta $\sim 117^\circ\text{W}$, destacando la presencia de un filamento (diferencia $\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$) con dirección hacia el suroeste.

Las fechas sin viento Santa Ana fueron las mismas que las empleadas en el análisis de TSM. En general se observó que la CHL promedio fue mayor que la CHL registradas en las fechas sin Santa Ana, ya que los valores de las diferencias en el área de estudio fueron mayoritariamente negativos, con las diferencias mayores a -0.3 mg m^{-3} restringidas a la zona costera (Fig. 7).

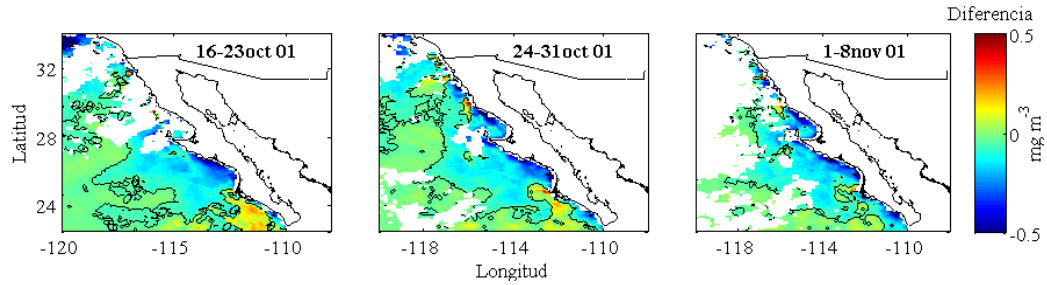


Figura 7. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y la CHL promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).

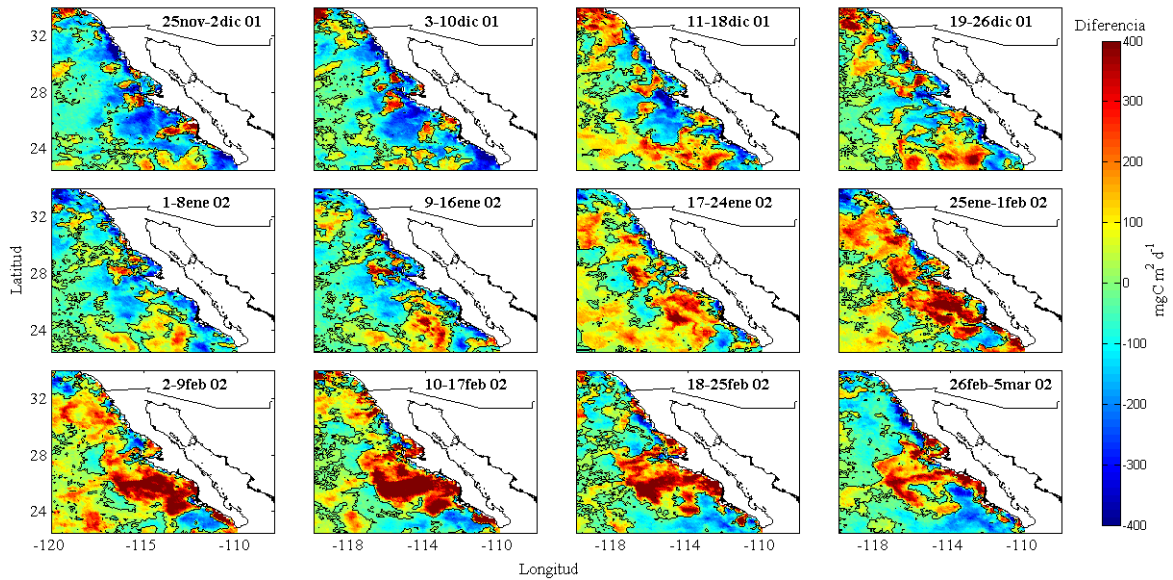


Figura 8. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y la PP promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

El patrón de distribución de las diferencias de PP en las fechas con viento Santa Ana mostró en general un aumento progresivo con el tiempo en las diferencias positivas ($> 200 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Se observaron diferencias positivas mayores a $300 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ desde finales de enero a principios de marzo, delimitadas entre $24\text{-}28^\circ\text{N}$ desde la costa hasta $\sim 117^\circ\text{W}$. Destaca la presencia de un filamento (de diferencias $\sim 100 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) con dirección al suroeste, desde los 28°N hasta $\sim 24^\circ\text{N}$ - 120°W en las imágenes: 18-25feb 02 y 26feb-5mar 02 (Fig. 8). En la figura 9 correspondientes a las imágenes sin viento Santa Ana, en general se observa la predominancia de valores negativos asociados a la zona costera entre $24\text{-}28^\circ\text{N}$ y al norte de 34°N .

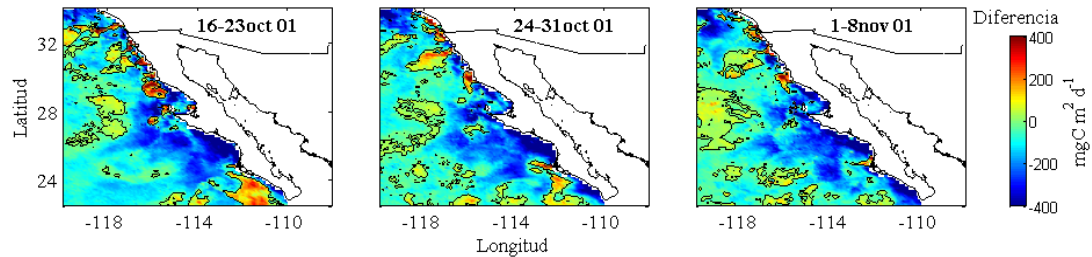


Figura 9. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y la PP promedio para el periodo 1. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

En el análisis de conglomerados se consideraron las fechas con y sin viento Santa Ana: S9-S21 y S4-S6, respectivamente, se utilizó como variables los promedios de TSM y CHL de toda el área de estudio. El dendograma se dividió en tres grupos (Fig.10): el primero (g1) y el segundo (g2) compuestos por las imágenes con ocurrencia de viento Santa Ana y el tercero (g3) con imágenes sin viento Santa Ana (S4-S5).

Los valores característicos de TSM y CHL para los grupos se listan en la Tabla 6. En general, se observa una asociación inversa entre TSM y CHL. Por ejemplo, el grupo 3 (g3) registró el mayor valor de TSM (20.95°C) y el menor valor de CHL (0.17 mg m^{-3}). En este grupo se asociaron las imágenes sin viento Santa Ana (S4-S5). Para los grupos con imágenes con presencia de viento Santa Ana (g1 y g2) se observó menor TSM y mayor CHL, 17.67°C - 0.32 mg m^{-3} y 18.76°C - 0.24 mg m^{-3} , respectivamente (Fig. 10 y Tabla 6).

La matriz de correlación realizada entre la TSM promedio y CHL promedio de las imágenes con viento Santa Ana para todo el área de estudio mostró una relación inversa estadísticamente significativa entre las variables ($r=-0.71$; $p=0.009$).

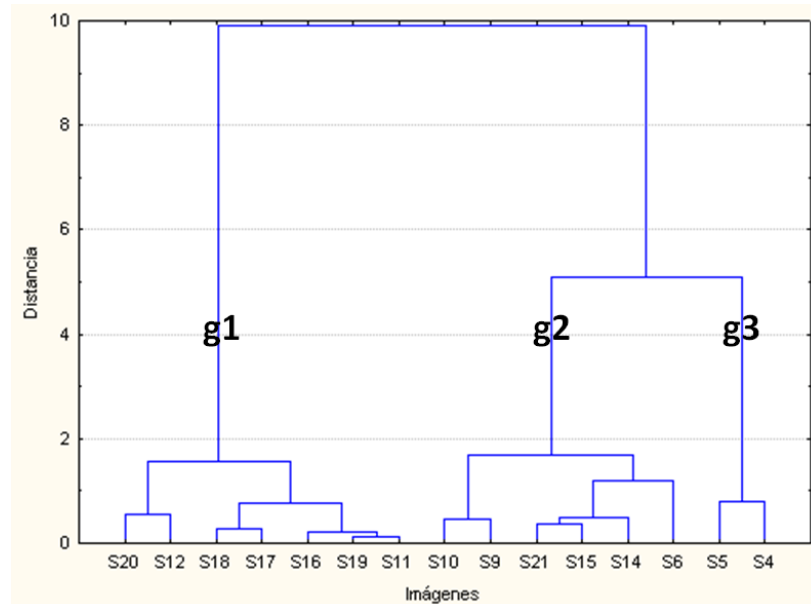


Figura 10. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de TSM y CHL para las fechas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 1. S4: 16-23oct 2001; S5: 24-31oct 2001; S6: 1-8nov 2001; S9: 28nov-2dic 2001; S10: 3-10dic 2001; S11: 11-18dic 2001; S12: 19-26dic 2001; S14: 1-8ene 2002; S15: 9-16ene 2002; S16: 17-24ene 2002; S17: 25ene-1feb 2002; S18: 2-9feb 2002; S19: 10-17feb 2002; S20: 18-25feb 2002; S21: 26feb-5mar 2002.

Tabla 6. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; prom= promedio; error=error estándar.

grupos (ns)	TSM (°C)		CHL (mg m ⁻³)	
	prom	error	pro	error
g1 (7)	17.67	0.0048	0.32	0.0012
g2 (6)	18.76	0.0065	0.24	0.0012
g3 (2)	20.95	0.0128	0.17	0.0011

3.1.3 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa

En el diagrama Hovmöller se observa la variación estacional de la TSM a lo largo de la costa, en otoño valores mayores y en invierno menores (Fig. 11). En general, a lo largo de la costa la TSM fue baja ($< 18\text{ }^{\circ}\text{C}$) sobre 28°N y alta ($> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) al sur de esta latitud. A partir de diciembre la isoterma de $\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ se desplazó desde 27°N hacia el sur del área de estudio hasta 23°N . Se observó una disminución de la temperatura a lo largo de la costa de $\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto a las fechas próximas, a mediados de octubre, principios de noviembre, finales de diciembre, desde finales de enero hasta principios de marzo. Este periodo coincide con la ocurrencia de viento Santa Ana y hacia finales del periodo de estudio (Fig. 11).

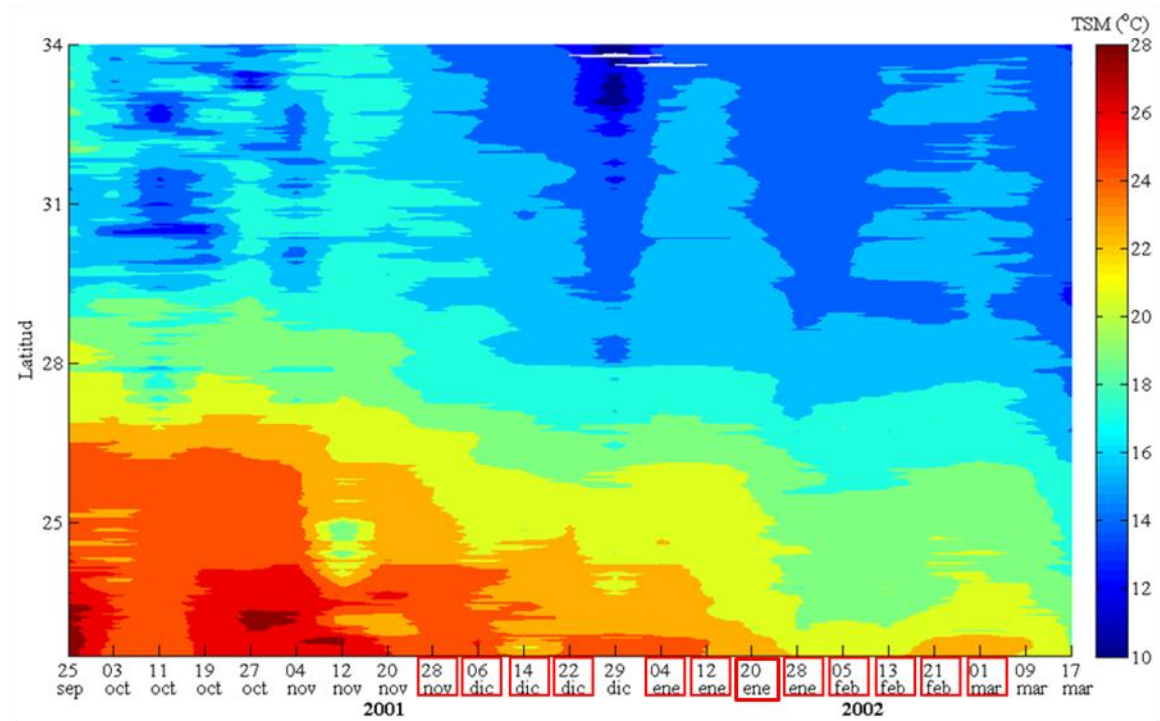


Figura 11. Diagrama Hovmöller semanal-latitudinal de TSM para el periodo 1. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

La variación temporal de CHL a lo largo de la costa se muestra en la figura 12. El intervalo de los valores registrados fue entre 0.1 y 4 mg m^{-3} . Valores de CHL mayores a 2 mg m^{-3} se

observaron como núcleos ubicados a 31 y $\sim 28^{\circ}\text{N}$ a principios del periodo de estudio, $\sim 24.5^{\circ}\text{N}$ a mediados de noviembre, 26°N a finales de noviembre, $\sim 23-24^{\circ}\text{N}$ a finales de enero, 33.5°N a mediados de febrero y a 24.5 , 31 y 34°N en marzo del 2002. En este último periodo los valores mayores a 1.5 mg m^{-3} se presentaron a lo largo de la costa. A 24.5 , 27 , 28 , ~ 30 y 33.5°N se observaron a través del tiempo valores de CHL mayores a 1.0 mg m^{-3} , visualizándose como líneas horizontales continuas (Fig. 12). En general, en las fechas de ocurrencia de viento Santa Ana se observaron aumentos en la CHL distribuida heterogéneamente a lo largo de la costa, especialmente desde finales de enero hasta principios de marzo (Fig. 12).

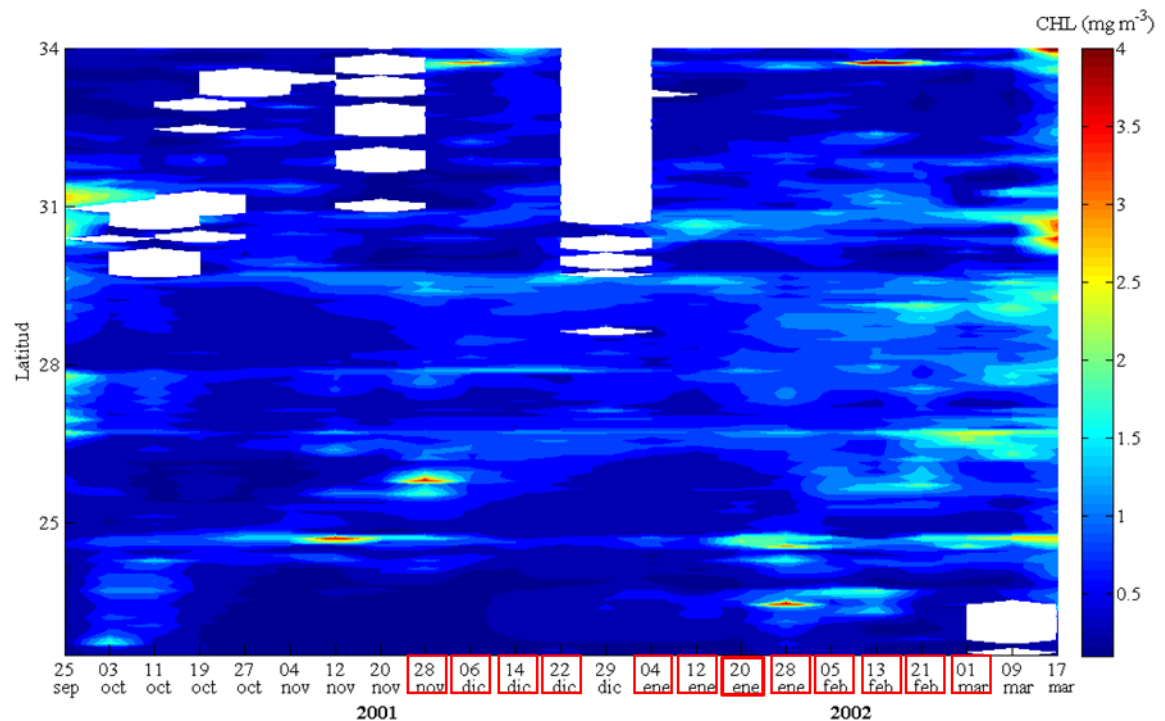


Figura 12. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL, para el periodo 1. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

La variabilidad espacio-temporal de la PP a lo largo de la costa muestra valores mayores a $1500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a principios del periodo de estudio y desde finales de noviembre hasta final del periodo (Fig. 13). Se observó aumento de PP desde febrero a marzo de $\sim 1000 \text{ mgC}$

$\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ respecto a los meses anteriores, especialmente entre 25-31 °N, lo que coincide con las últimas fechas donde se registró viento Santa Ana en el periodo 1. A 24.5, 27, 28, ~30 y 33.5 °N, al igual que en la distribución de CHL se observaron valores altos de PP $\sim 1500 \text{ mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ a través del tiempo.

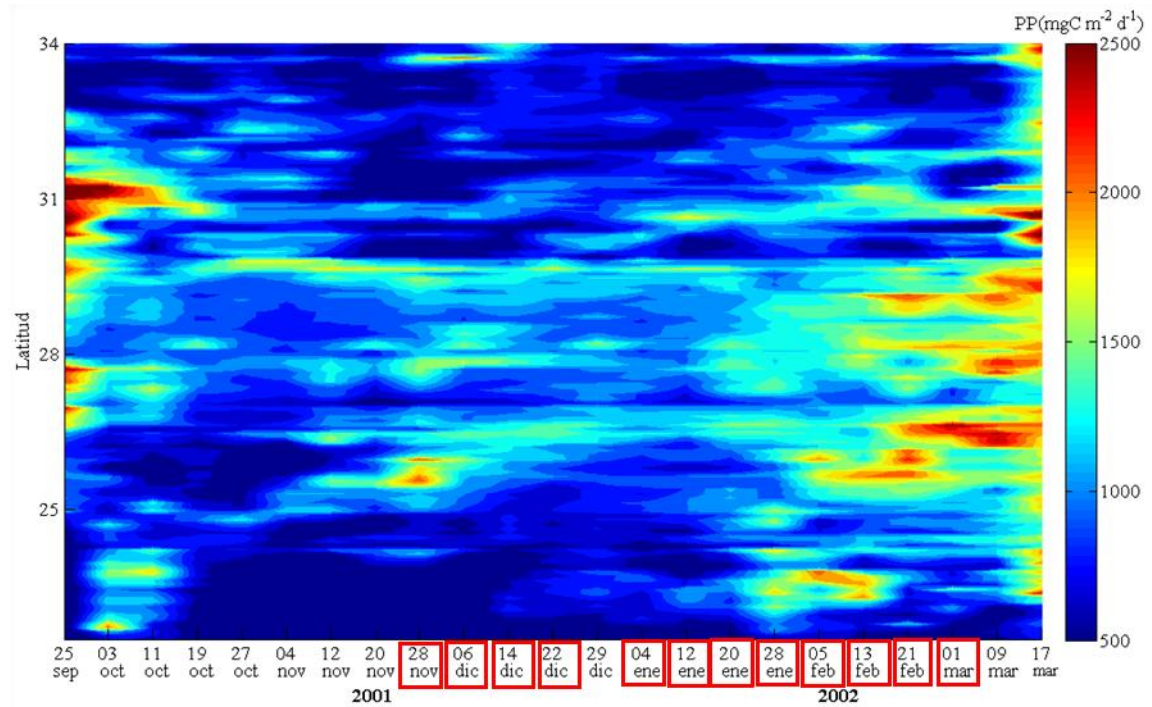


Figura 13. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP para el periodo 1. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

3.1.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada

La figura 14 muestra la distribución en el tiempo de los valores promedios de TSM, CHL y PP en la cuadrícula seleccionada (Fig.1). En general, se observa que la TSM disminuyó con el tiempo (Fig. 14a), el intervalo de TSM varió entre 16.5 y 22 °C en la última semana y a mediados de octubre, respectivamente. Teniendo en cuenta las fechas con viento Santa Ana se observó disminución en la TSM de ~ 1.5 °C desde finales de noviembre a finales de diciembre y desde mediados de enero hasta principio de febrero. El intervalo de los valores promedio de CHL fluctuó entre 0.15 y 0.38 mg m^{-3} (Fig. 14b). Los valores mínimos se

registraron entre mediados de octubre y finales de noviembre (0.15 mg m^{-3}), mientras que los valores máximos se observaron desde finales de enero hasta mediados de febrero (0.35 mg m^{-3}) y en la última semana del estudio (0.38 mg m^{-3}). Considerando las fechas de ocurrencia de viento Santa Ana (desde finales de noviembre hasta principio de marzo) se observó que la CHL promedio aumentó respecto a las fechas sin viento Santa Ana (septiembre a mediados de noviembre) 0.26 y 0.16 mg m^{-3} , respectivamente. La CHL promedio de las primeras semanas con presencia de viento Santa Ana (finales de noviembre a mediados de enero) fue de 0.21 mg m^{-3} y para los eventos ocurridos entre finales de enero y principio de marzo la CHL promedio fue de 0.33 mg m^{-3} (Fig. 14b). La PP promedio varió entre 350 y $750 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con una distribución en el tiempo similar a la CHL (Fig. 14 c).

Se observa un incremento de CHL y PP coincidente con una leve disminución en la TSM de 0.15 mg m^{-3} , $\sim 200 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $\sim 1^\circ \text{C}$ respectivamente, entre el inicio y final de enero (Fig.14).

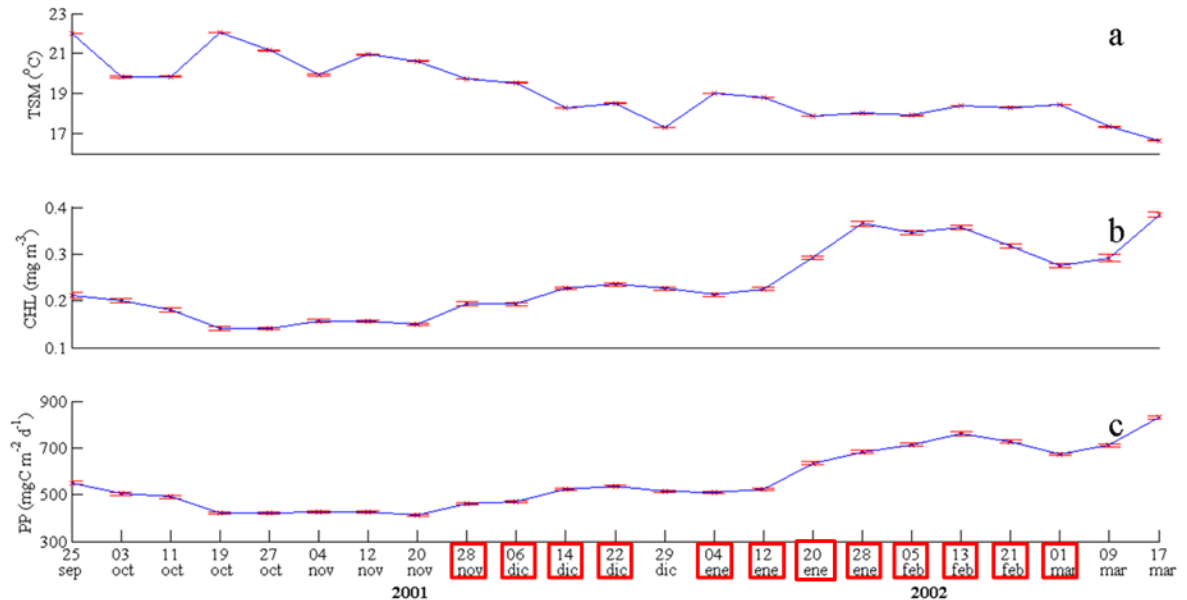


Figura 14. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 1 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

En el análisis de conglomerado de la figura 15 se consideraron las fechas donde se registró viento Santa Ana y se utilizaron los promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada. A partir de este análisis se obtuvieron tres grupos (g1-g3). El grupo (g1) se caracterizó por presentar el menor promedio de TSM, el mayor promedio de CHL y la máxima magnitud promedio del viento (Tabla 7). Las imágenes asociadas a este grupo fueron desde mediados de enero a finales de febrero de 2002. El segundo grupo (g2) coincidió con las imágenes de mediados de diciembre del 2001 y principios de enero del 2002 y se caracterizó por presentar los valores medios de TSM ($18.61\text{ }^{\circ}\text{C}$), CHL (0.24 mg m^{-3}) y magnitud del viento (7.93 m s^{-1}). El grupo 3 (g3) correspondió a las primeras imágenes donde se observó viento Santa Ana en el periodo de estudio (finales de noviembre hasta finales de diciembre del 2002), con mayor TSM y los promedios menores de CHL y magnitud del viento (Tabla 7).

La matriz de correlación entre los promedios de TSM y CHL en fechas con viento Santa Ana para la cuadrícula, mostró una relación inversa significativa entre las variables ($r=-0.78$; $p=0.003$), con TSM menor (mayor) y CHL mayor (menor).

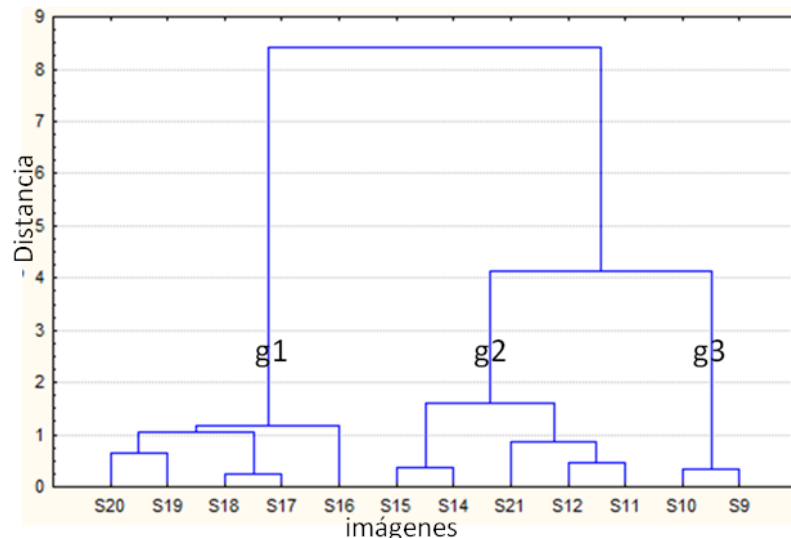


Figura 15. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 1. S9: 28nov-2dic 2001; S10: 3-10dic 2001; S11: 11-18dic 2001; S12: 19-26dic 2001; S14: 1-8ene 2002; S15: 9-16ene 2002; S16: 17-24ene 2002; S17: 25ene-1feb 2002; S18: 2-9feb 2002; S19: 10-17feb 2002; S20: 18-25feb 2002; S21: 26feb-5mar 2002.

Tabla 7. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 1. ns= número de semanas; n= número de datos; prom= promedio; error= error estándar.

grupos (ns)	TSM (°C)		CHL (mg m ⁻³)		Magnitud del viento (m s ⁻¹)	
	prom (n)	error	prom (n)	error	prom (n)	error
g1 (5)	18.10 (41213)	0.0062	0.33 (10824)	0.0021	8.46 (666)	0.077
g2 (5)	18.61 (40923)	0.0062	0.24 (8847)	0.0017	7.93 (518)	0.060
g3 (2)	19.64 (16506)	0.010	0.21 (3221)	0.0035	6.89 (222)	0.123

3.2 Periodo 2: 21 septiembre de 2002- 21 de marzo de 2003

3.2.1 Determinación de las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana

En general, desde noviembre hasta febrero fueron observados valores de HR menores a 50%, con los valores mínimos (HR <20%) registrados a mediados de noviembre en las estaciones de Ensenada y Gustavo Díaz Ordaz. Las disminuciones en la HR fueron similares en las tres estaciones meteorológicas (Fig. 16).

Teniendo en cuenta las fechas donde se registraron HR menores a 50% y donde se observó viento proveniente del primer cuadrante (Fig. 17), se cuantificaron 15 eventos Santa Ana para el periodo 2 con duración de uno y dos días. El mayor número de eventos fue registrado en diciembre. Los eventos fueron asociados a 11 fechas de imágenes satelitales y en cuatro de ellas coincidieron dos eventos (17-24nov 2002, 25nov-2dic 2002, 27-31dic 2002 y 1-8ene 2003) (Tabla 8).

En general, la presencia del viento de Santa Ana fue restringida a pequeñas áreas con magnitudes entre 2-9 m s⁻¹. La mayor cobertura espacial del viento Santa Ana se observó en los días 19 y 27 de diciembre de 2002, entre 22.5-30 °N. En estas fechas además se registró su máxima extensión desde Punta Eugenia (~28 °N) hasta 22.5 °N-120 °W (en dirección suroeste) con una extensión aproximada de 900 km (Fig.17).

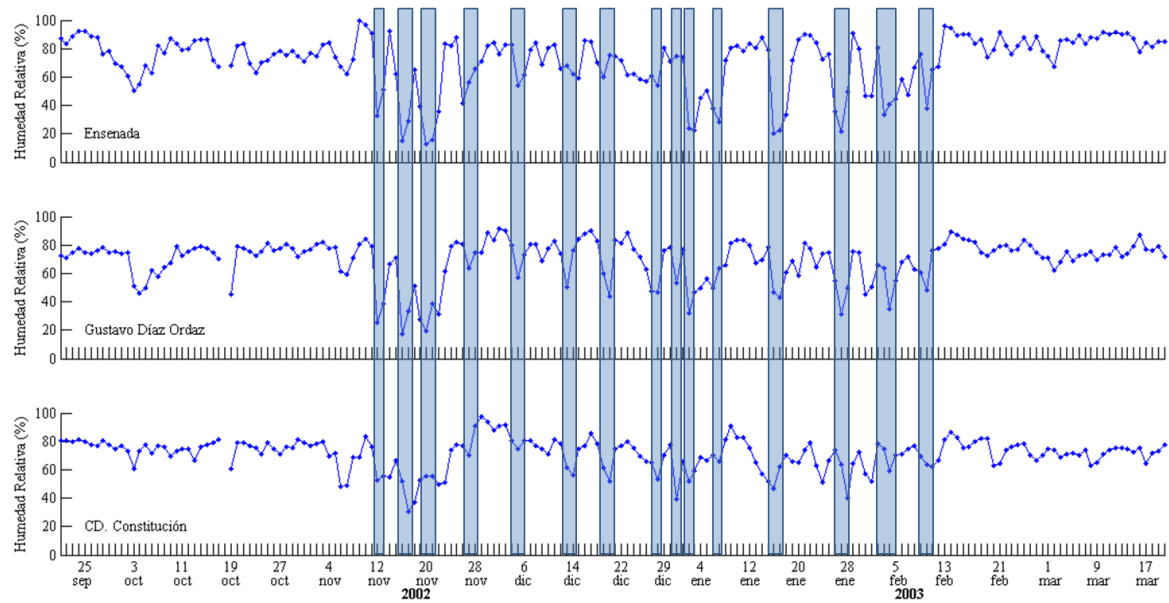


Figura 16. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 2 en las estaciones meteorológicas. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana considerando porcentaje de HR menor a 50%.

Tabla 8. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 2.

Eventos Santa Ana	Fechas HR	Fechas de viento Santa Ana	Fechas imágenes satelitales (TSM, CHL y PP)
1	12-13 nov 2002	13 nov 2002	9-16 nov 2002
2	17-18 nov 2002	17-18 nov 2002	17-24 nov 2002
3	20-21 nov 2002	21 nov 2002	
4	28 nov 2002	28 nov 2002	25 nov-2 dic 2002
5	3 dic 2002	2-3 dic 2002	
6	13 dic 2002	12-13 dic 2002	11-18 dic 2002
7	19-20 dic 2002	19 dic 2002	19-26 dic 2002
8	27-28 dic 2002	27-28 dic 2002	27-31 dic 2002
9	31 dic 2002	31 dic 2002	
10	2-3 ene 2003	3 ene 2003	1-8 ene 2003
11	6-7 ene 2003	6-7 ene 2003	
12	16-17 ene 2003	16 ene 2003	9-16 ene 2003
13	27 ene 2003	25-26 ene 2003	25 ene-1 feb 2003

14	3-4 feb 2003	3-4 feb 2003	2-9 feb 2003
15	9-10 feb 2003	9-10 feb 2003	10-17 feb 2003

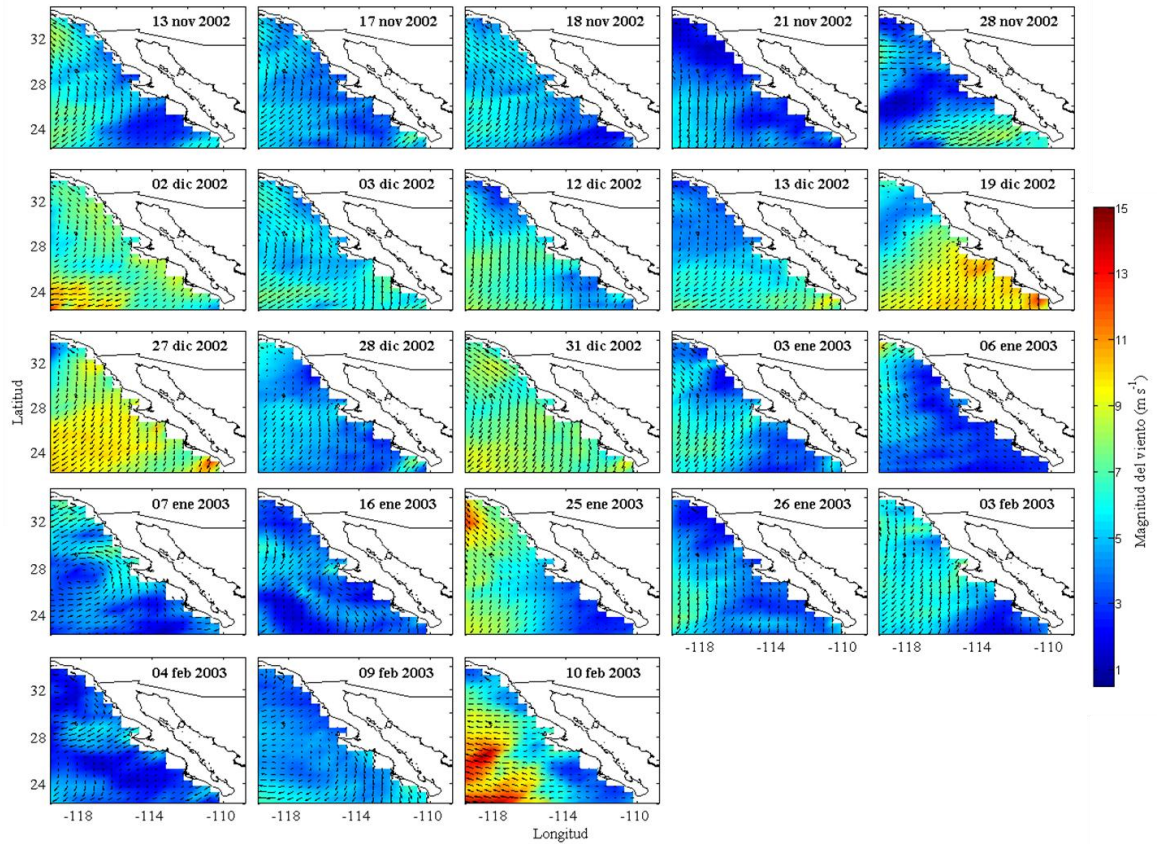


Figura 17. Magnitud y dirección de los vientos Santa Ana durante el periodo 2.

3.2.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio

En las primeras imágenes de noviembre hasta mediados de diciembre 2002 predominan las diferencias positivas en temperatura ($> 1^{\circ}\text{C}$), lo que indica que la TSM en esas fechas es más alta que el promedio. Desde la imagen del 19-26dic 2002 en adelante se observaron valores negativos de aproximadamente -1°C en la mayor parte del área de estudio. En la imagen de 27-31dic 02 se observaron las mayores diferencias negativas del periodo de estudio ($\sim -2^{\circ}\text{C}$) asociadas a la zona oceánica (Fig. 18).

Las diferencias de TSM en fechas sin viento Santa Ana (Fig. 19), muestran en general valores positivos en toda el área de estudio, lo que indica que la TSM en las tres imágenes es mayor que el promedio.

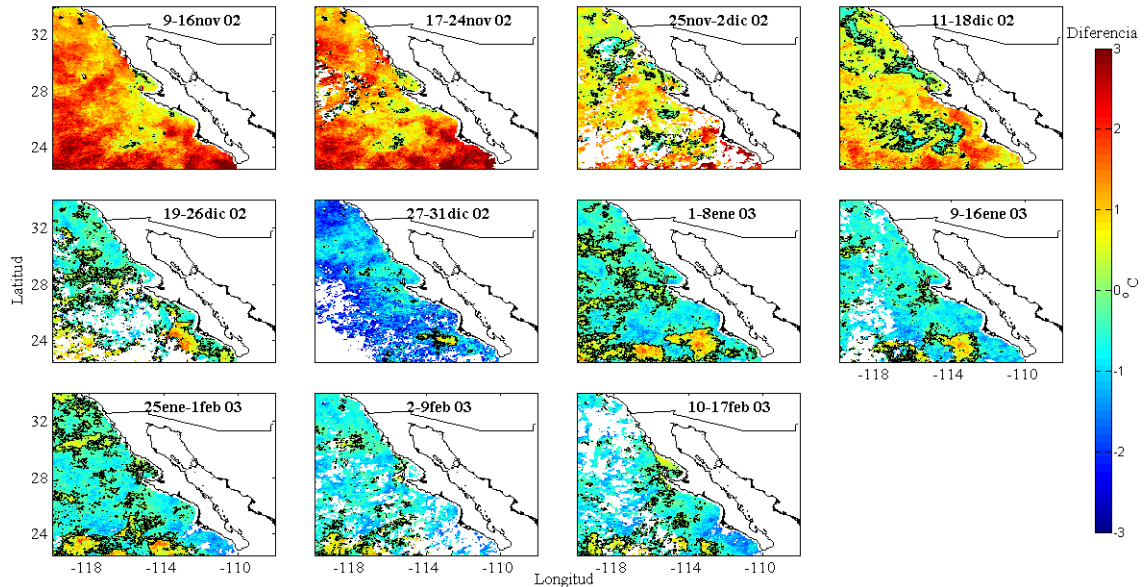


Figura 18. Diferencias entre TSM con viento Santa Ana y TSM promedio del periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 °C).

Para las fechas con presencia de viento Santa Ana, las diferencias de CHL muestran valores negativos asociados a la costa, especialmente entre 24-34 °N durante todo el periodo de estudio. Los valores positivos ($>0.1 \text{ mg m}^{-3}$) fueron observados a partir de mediados de diciembre hasta principios de enero, distribuidos en forma heterogénea en una franja paralela a la costa. En la imagen del 27-31 dic 2002, se registraron las mayores diferencias positivas ($\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$) en las cercanías a Punta Eugenia ($\sim 28^\circ \text{N}$) (Fig. 20).

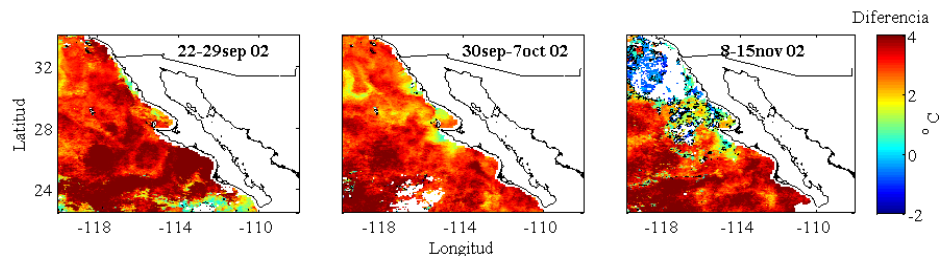


Figura 19. Diferencias entre TSM sin viento Santa Ana y TSM promedio para el periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 °C).

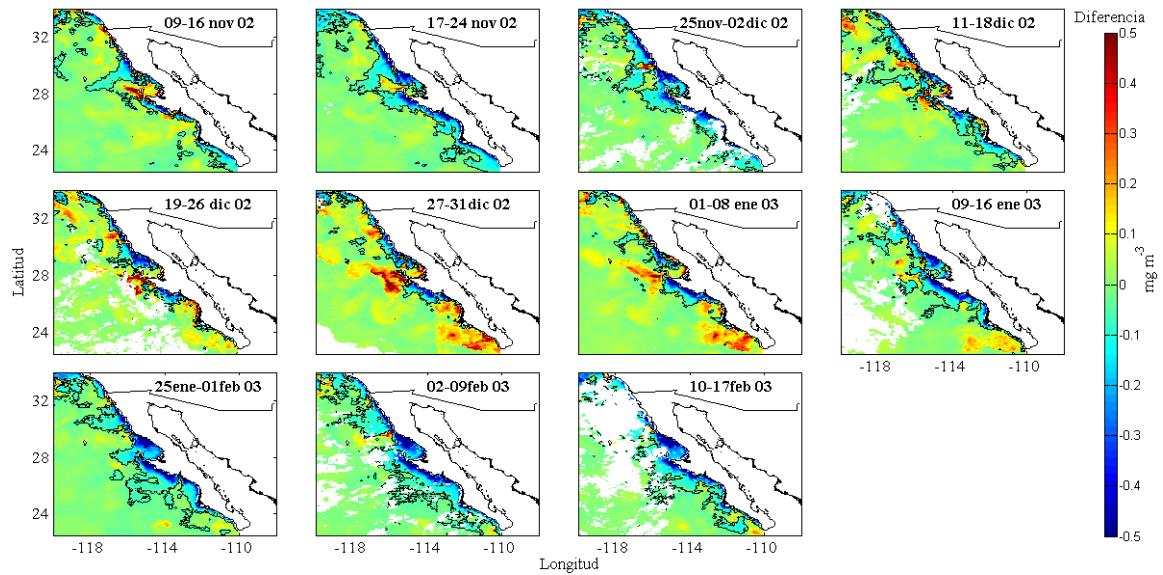


Figura 20. Diferencias entre CHL con viento Santa Ana y CHL promedio del periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).

En la figura 21 se observan las diferencias de CHL en las imágenes sin viento Santa Ana, con valores mayores a 0.3 mg m^{-3} en Bahía Vizcaíno ($28-29^\circ\text{N}$) y zonas aledañas.

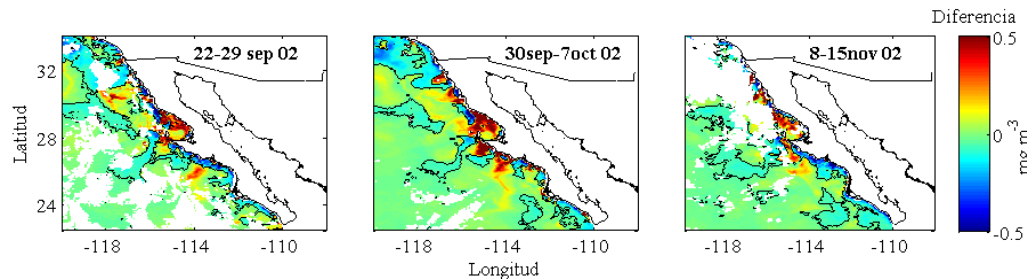


Figura 21. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y CHL promedio para el periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).

Las diferencias de PP en las fechas con viento Santa Ana para el periodo 2 muestran un patrón similar al de la CHL, con valores negativos ($\sim -200 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) asociados a la zona costera y diferencias positivas mayores a $300 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ observadas en la zona cercana a 28°N y hacia el sur de 24°N cerca a la costa desde fines de diciembre a principios de enero, (Fig. 22).

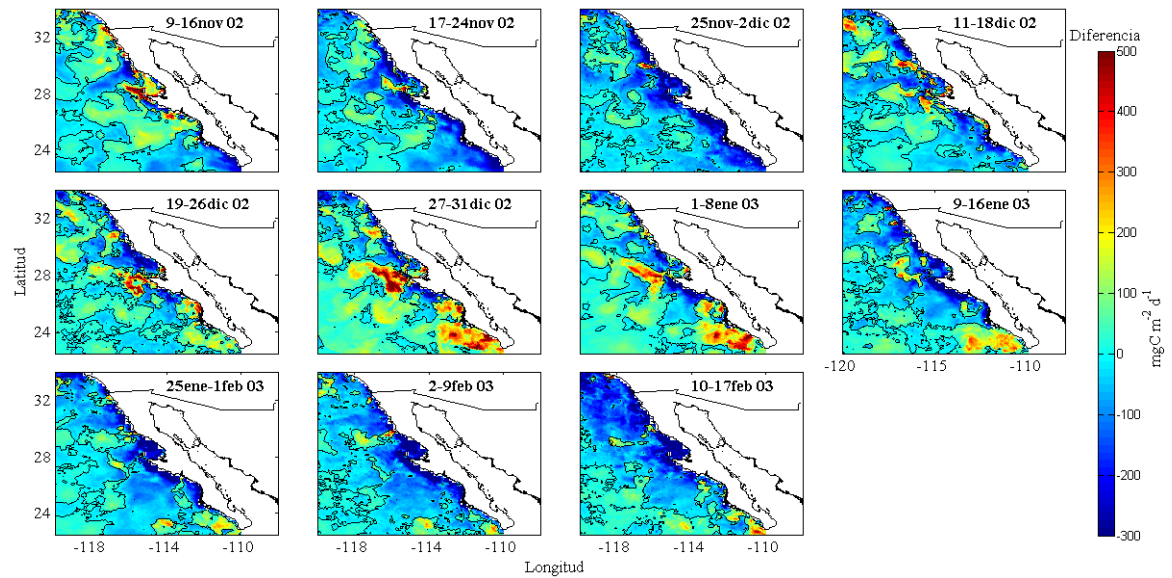


Figura 22. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y PP promedio del periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

En la figura 23 se observan diferencias positivas de PP mayores a $300 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en una franja paralela a la costa entre $26\text{--}32^\circ \text{N}$. En general, en las fechas sin viento Santa Ana se registró mayor presencia de diferencias positivas de PP en el área de estudio que en las fechas con presencia de viento Santa Ana.

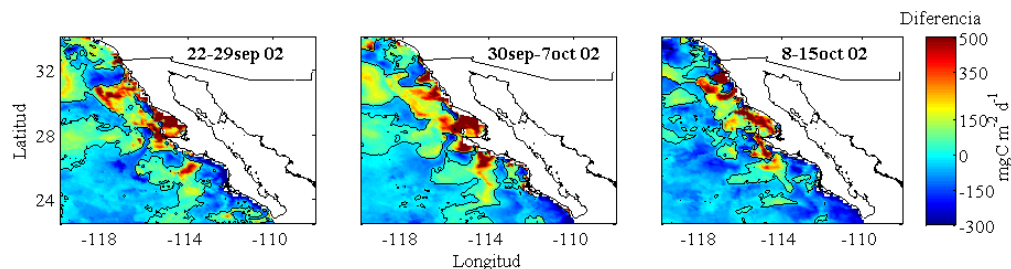


Figura 23. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y PP promedio para el periodo 2. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Se utilizaron los promedios de TSM y CHL del área de estudio de las fechas con y sin viento Santa Ana del análisis anterior, el análisis de conglomerado agrupó los eventos en tres grupos: g1, g2 y g3 (Fig. 24). En el grupo 1 se asociaron fechas con y sin viento Santa Ana caracterizándose por presentar TSM promedio de 19.16°C y 0.19 mg m^{-3} de CHL. En

g2 se agruparon sólo fechas donde hubo viento Santa Ana. Este grupo presentó el menor promedio de TSM y el mayor promedio de CHL del análisis. En el grupo con fechas sin viento Santa Ana (g3) se registró CHL intermedia (0.25 mg m^{-3}) y la mayor TSM (22°C) (Tabla 9).

Tabla 9. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; prom= promedio; error=error estándar.

grupos (ns)	TSM ($^\circ\text{C}$)		CHL (mg m^{-3})	
	pro	error	prom	error
g1 (6)	19.16	0.0065	0.19	0.0005
g2 (6)	18.65	0.0055	0.27	0.0006
g3 (2)	22.00	0.009	0.25	0.0018

La correlación entre los promedios de TSM y CHL del área de estudio para las fechas con viento Santa Ana no fue estadísticamente significativa ($r=-0.15$, $p= 0.650$).

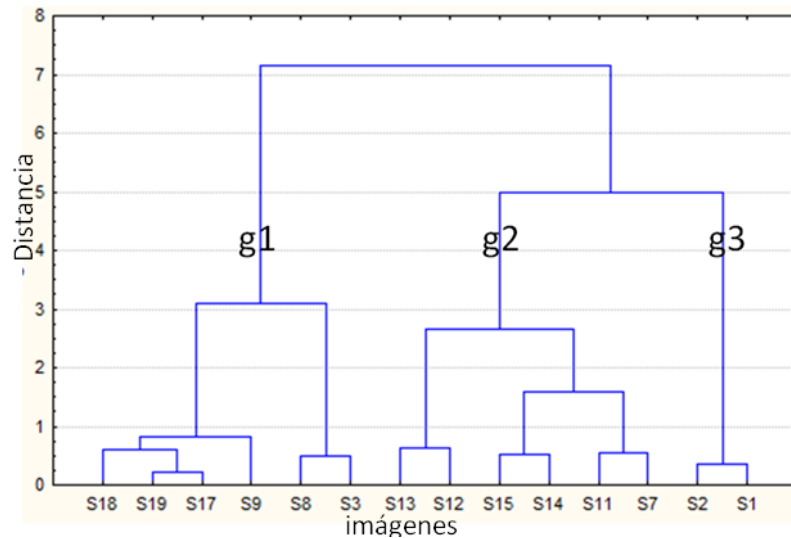


Figura 24. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de TSM y CHL para las fechas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 2. S1= 22-29sep 2002; S2= 30sep-7oct 2002; S3= 8-15oct 2002; S7= 9-16nov 2002; S8=17-24nov 2002; S9= 28nov-2dic 2002; S11= 11-18dic 2002; S12= 19-26dic 2002; S13= 27-31dic 2002; S14= 1-8ene 2003; S15= 9-16ene 2003; S17= 25ene-1feb 2003; S18= 2-9feb 2003; S19= 10-17feb 2003.

3.2.3 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa

La figura 25 muestra el diagrama Hovmöller de TSM a lo largo de la costa. La TSM registrada varió entre 12 y 28 °C para este periodo de estudio. En general, se observaron aguas frías (<15 °C) al norte de 28 °N y aguas cálidas (>20 °C) al sur de esta latitud. Se registró disminución de TSM (~1 °C) a lo largo de la costa respecto a las fechas adyacentes, en fechas sin viento Santa Ana (principio y final de octubre) y con viento Santa Ana (finales de noviembre, finales de diciembre y principios de enero) (Fig. 25).

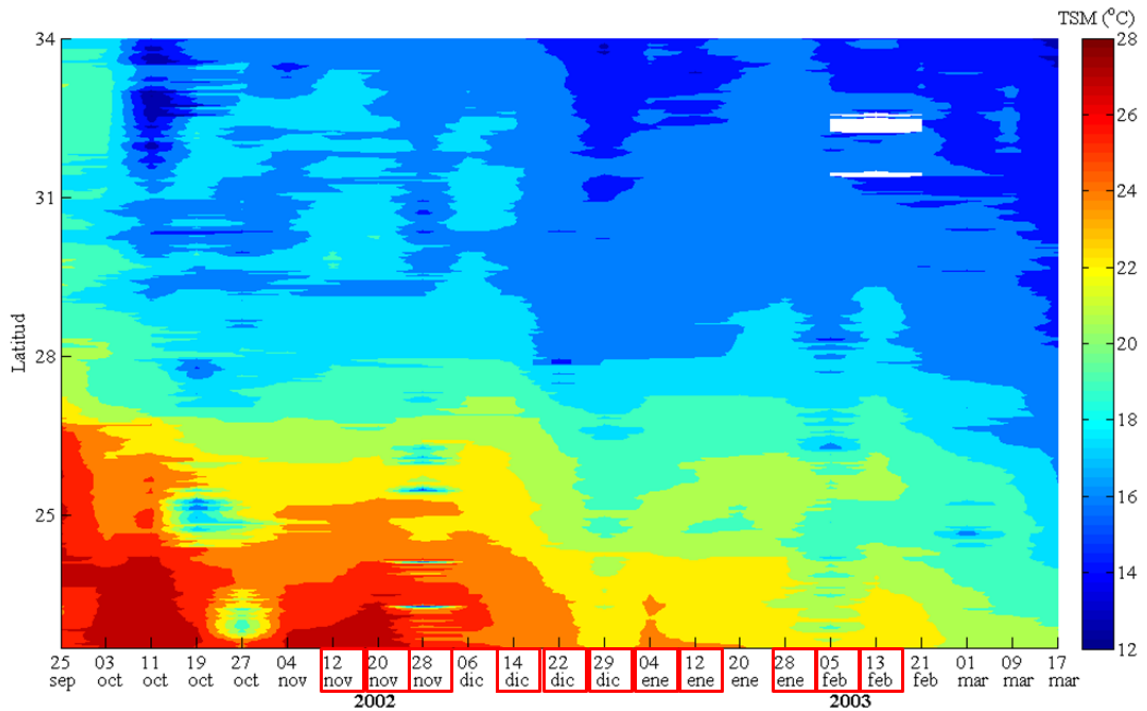


Figura 25. Diagrama Hovmöller semana-latitud de TSM, para el periodo 2. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

La CHL a lo largo de la costa varió entre 0.1 y 6 mg m⁻³. Los valores máximos (>3 mg m⁻³) se observaron al principio del periodo de estudio con núcleos centrados ~29 °N y 27.5 °N y a mediados de marzo a lo largo de la costa. En las latitudes de 27, 28, 29.5 °N, 32 y 33.5 °N se observaron valores de CHL de ~1.5 mg m⁻³ a través del tiempo, visualizándose como líneas horizontales continuas. Se detectó aumento de CHL a lo largo de la costa desde mediados de octubre a principios de noviembre coincidente con fechas sin viento Santa Ana

Ana y desde mediados de diciembre hasta mediados de enero ($\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$) concordantes con presencia de viento Santa Ana (Fig. 26).

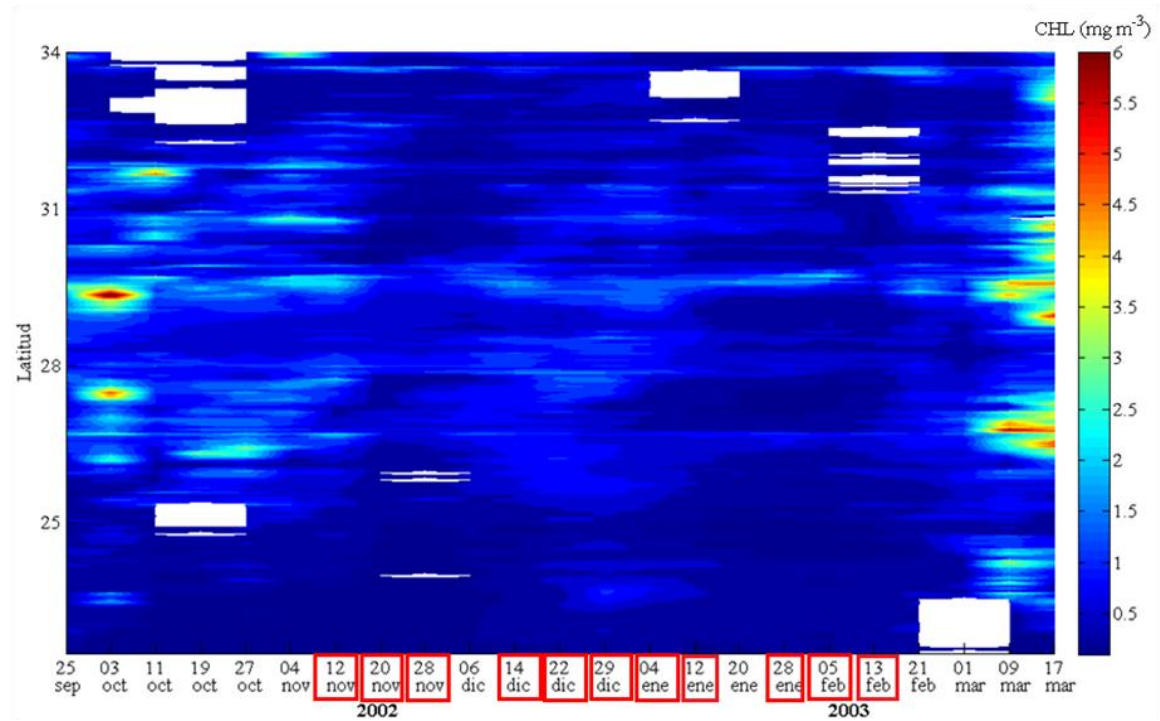


Figura 26. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL, para el periodo 2. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

La PP a lo largo de la costa fluctuó entre 500 y 3000 $\text{mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Los valores mayores a 2000 $\text{mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ se localizaron entre 26-32 °N desde final de septiembre hasta mediados de noviembre y a lo largo de la costa al final del periodo de estudio. Los valores de PP entre 1500 y 2000 $\text{mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ se observaron entre 25-30 °N, en fechas donde se registró viento Santa Ana (mediados de diciembre a mediados de enero). Se observaron líneas horizontales continuas a través del tiempo de aproximadamente 1500 mgC m^{-2} , a 24, 27, 28, 29 y 34 °N (Fig. 27).

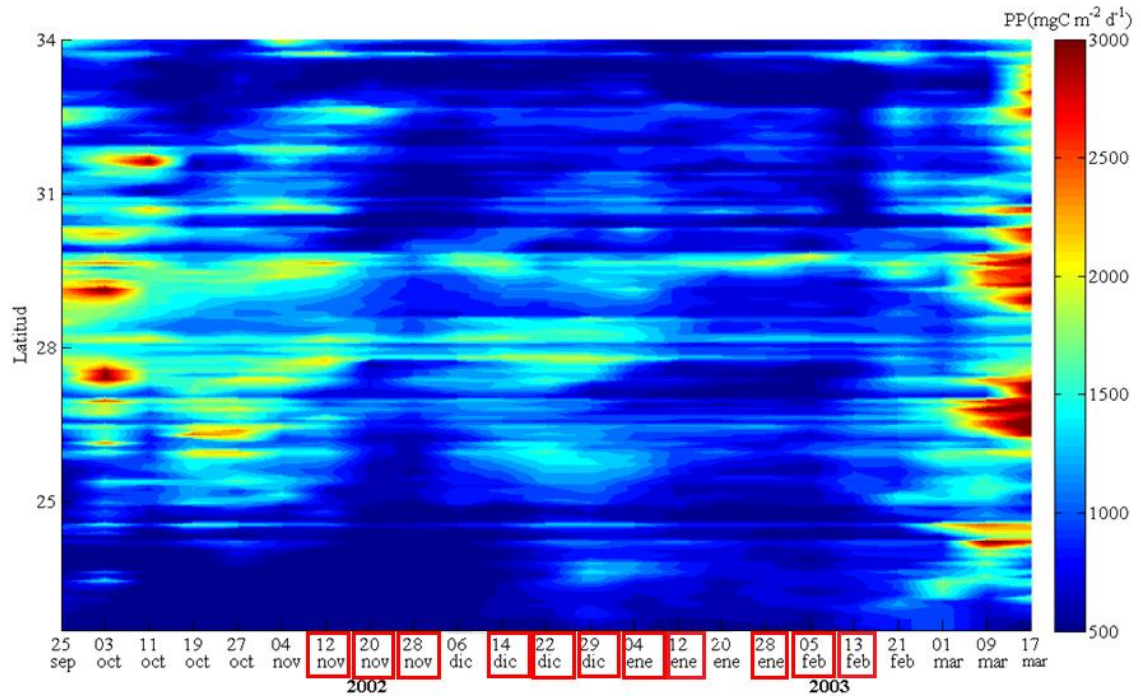


Figura 27. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP, para el periodo 2. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

3.2.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada

Los promedios de TSM de la cuadrícula seleccionada fluctuó entre 15.5 y 23 °C (Fig. 28a), con tendencia a disminuir en el tiempo. El intervalo de los promedios de CHL fue de 0.15 a 0.5 mg m⁻³ y el valor máximo se observó al final del período de estudio con una marcada diferencia con los demás valores. En general la CHL se mantuvo casi constante en el tiempo (Fig.28b). La figura 28c muestra la variación en el tiempo del promedio de PP en la cuadrícula con una variación similar a la CHL. El intervalo de valores fue entre 400 y 500 mgC m⁻² d⁻¹.

En las fechas con viento Santa Ana no se observó el mismo comportamiento en las variables (cuadros rojos en Fig. 28). En noviembre la TSM no mostró cambios, sin embargo la CHL y PP disminuyeron levemente. Entre diciembre y enero la TSM presentó una leve disminución, la CHL y PP aumentaron hasta los valores máximos respectivos. En febrero la TSM no mostró cambios notorios. Los valores CHL y PP fueron los mínimos del registro (Fig. 28).

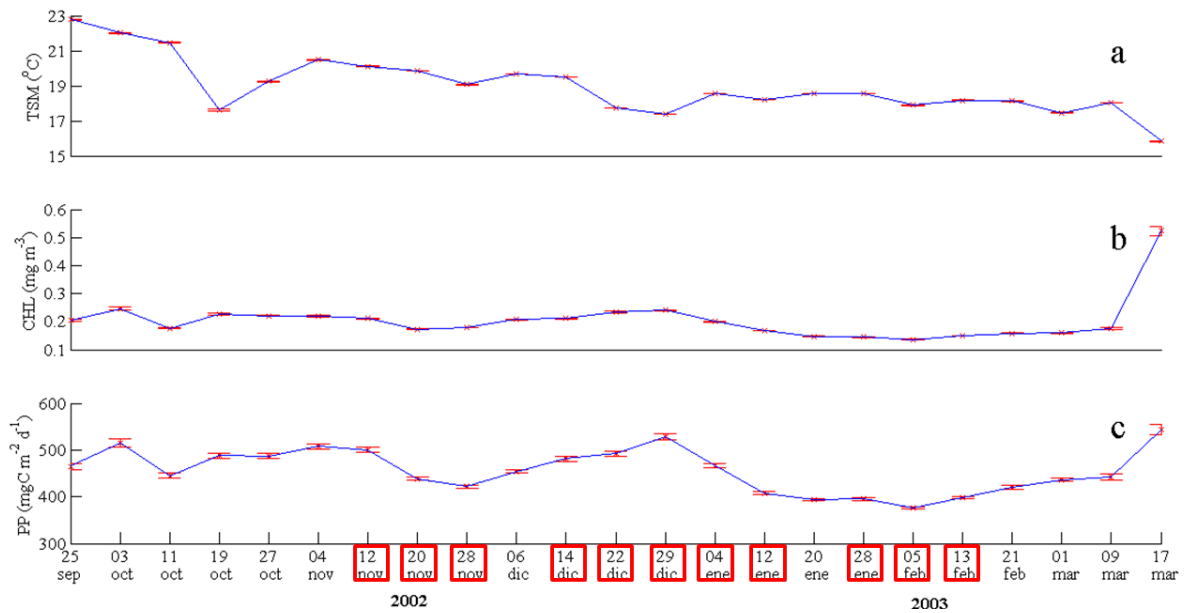


Figura 28. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 2 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

En el análisis de conglomerado para la cuadrícula utilizando los períodos con ocurrencia de viento Santa Ana se obtuvieron tres grupos (Fig. 29). El grupo 1 se asoció a las imágenes de principios de enero hasta marzo del 2003, con valores intermedios de TSM (18.21 °C) y el menor promedio de CHL (0.15 mg m⁻³). El grupo 2 mostró la menor TSM (17.56 °C) y mayor CHL (0.24 mg m⁻³), con las imágenes agrupadas pertenecientes a finales de diciembre 2002. El grupo 3 se caracterizó por presentar la mayor TSM (19.42 °C) y CHL intermedia (0.20 mg m⁻³) y en general se asoció con los eventos ocurridos entre principio de noviembre y mediados de diciembre del 2002 (Tabla 10).

La correlación entre los promedios de TSM y CHL para las imágenes con viento Santa en la cuadrícula seleccionada no fue estadísticamente significativa ($p=0.957$).

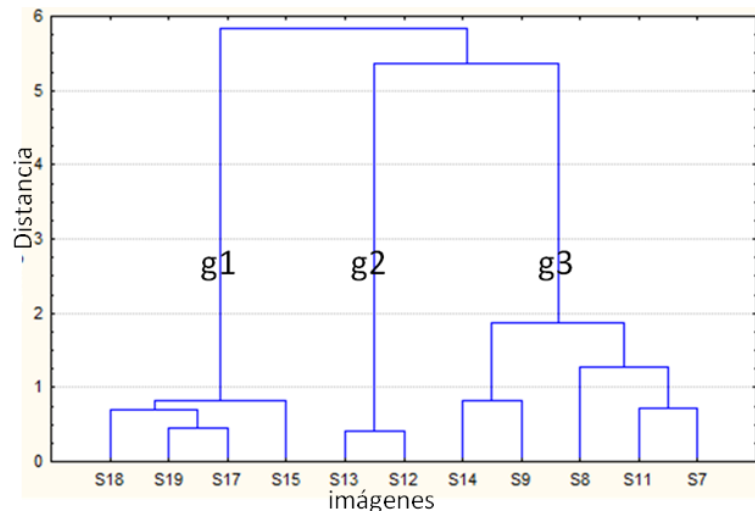


Figura 29. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 2. S7= 9-16nov 2002; S8= 17-24nov 2002; S9= 28nov-2dic 2002; S11= 11-18dic 2002; S12= 19-26dic 2002; S13=27-31dic 2002; S14= 1-8ene 2003; S15= 9-16ene 2003; S17= 25ene-1feb 2003; S18= 2-9feb 2003; S19= 10-17feb 2003.

Tabla 10. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 2. ns= número de semanas; número de datos; prom= promedio; error= error estándar.

grupos (ns)	TSM (°C)		CHL (mg m ⁻³)		Magnitud del viento (m s ⁻¹)	
	prom (n)	error	prom (n)	error	prom (n)	error
g1 (4)	18.21 (32391)	0.0070	0.15 (29062)	0.0005	4.72 (518)	0.07
g2 (2)	17.56 (16506)	0.0099	0.24 (15693)	0.0019	7.55 (296)	0.11
g3 (5)	19.42 (41055)	0.0058	0.2 (41558)	0.0008	4.74 (888)	0.04

3.3 Periodo 3: 21 septiembre de 2003- 21 de marzo de 2004

3.3.1 Determinación de las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana

Para el periodo 3 las disminuciones en HR (<50%) fueron registradas desde finales de octubre a mediados de febrero en las tres estaciones, con los valores mínimos de ~10% observados a finales de octubre en la estación de Ensenada (Fig. 30).

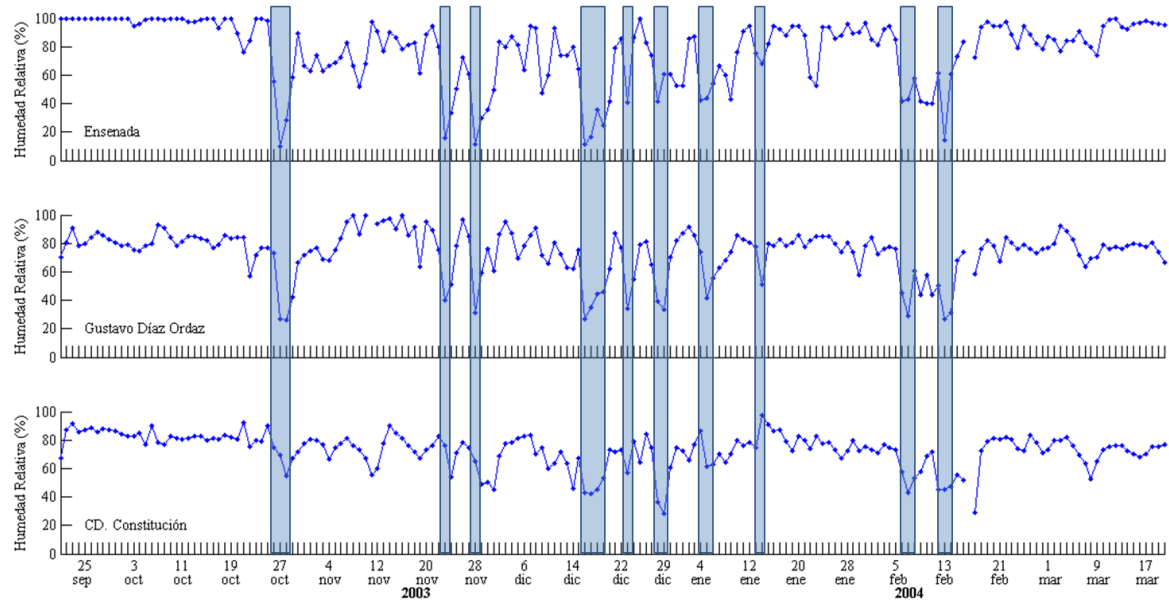


Figura 30. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 3 en las estaciones meteorológicas. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana considerando porcentaje de HR menor a 50%.

Tabla 11. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 3.

Evento	Fechas HR	Fechas de viento Santa Ana	Fechas imágenes (TSM, CHL y PP)
1	26-27 oct 2003	25 oct 2003	24-31 oct 2003
2	23-24 nov 2003	24 nov 2003	17-24 nov 2003
3	28 nov 2003	28 nov 2003	25nov-2dic 2003
4	17-18 dic 2003	16-17 dic 2003	11-18 dic 2003
5	23 dic 2003	23 dic 2003	19-26 dic 2003
6	28-29 dic 2003	29-30 dic 2003	27-31 dic 2003
7	5-6 ene 2004	6 ene 2004	1-8 ene 2004
8	14 ene 2004	14 ene 2004	9-16 ene 2004
9	6-7 feb 2004	6 feb 2004	2-9 feb 2004
10	12-13 feb 2004	13 feb 2004	10-17 feb 2004

Para el periodo 3 se registraron diez eventos Santa Ana, los cuales coincidieron con la misma cantidad de fechas de imágenes satelitales utilizadas. La duración de los eventos fue entre uno y dos días, con la mayor cantidad durante diciembre (Tabla 11).

La mayor cobertura espacial del viento Santa Ana se observó el 16 de diciembre de 2003, desde $\sim 30^\circ\text{N}$ hasta el norte de la zona de estudio. Las magnitudes del viento variaron de $1\text{--}13\text{ m s}^{-1}$, con la mayor extensión ($\sim 900\text{ km}$) el 29 de diciembre de 2003 (Fig. 31).

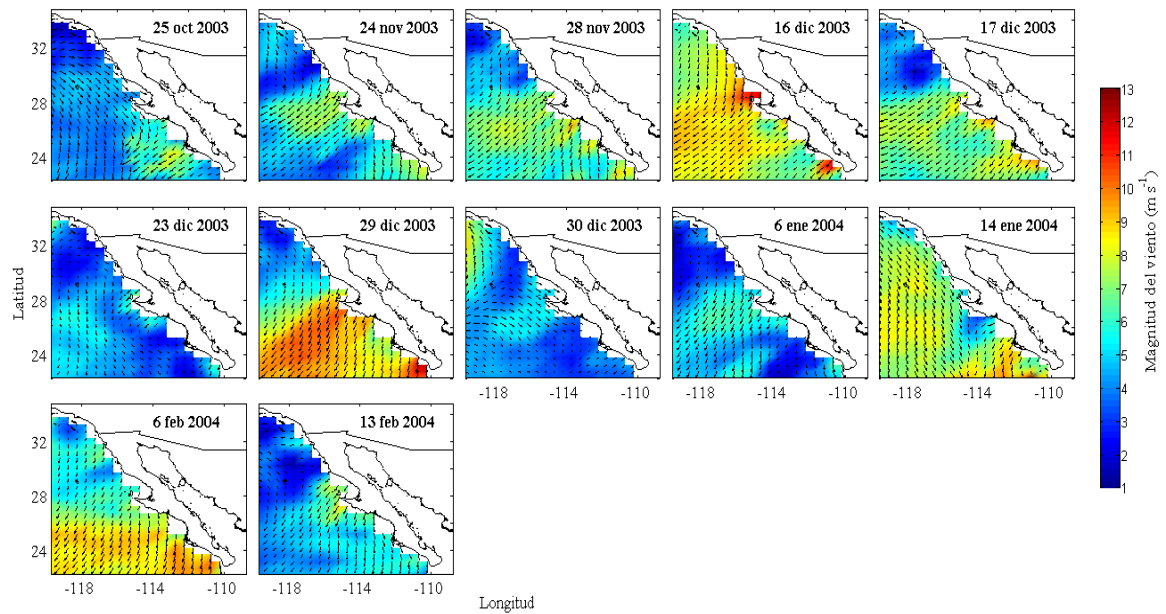


Figura 31. Magnitud y dirección del campo de viento durante el periodo 3.

3.3.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio

Las diferencias de TSM respecto al promedio para las fechas con viento Santa Ana muestran influencia de la estacionalidad (Fig. 32). Las diferencias positivas ($> 0.5^\circ\text{C}$) se observaron en el área de estudio desde finales de octubre hasta la imagen del 19-26 dic 2003, y los valores negativos desde finales de diciembre hasta febrero del 2004, observándose las mayores diferencias negativas ($\sim -3^\circ\text{C}$) en la imagen 27-31 dic 03 en la mayor parte del área de estudio y entre $24\text{--}28^\circ\text{N}$; $110\text{--}114^\circ\text{W}$ en las imágenes de febrero del 2004 (Fig. 32).

En las imágenes de diferencias de TSM en las fechas sin viento Santa Ana se observaron diferencias positivas en el área de estudio (Fig. 33).

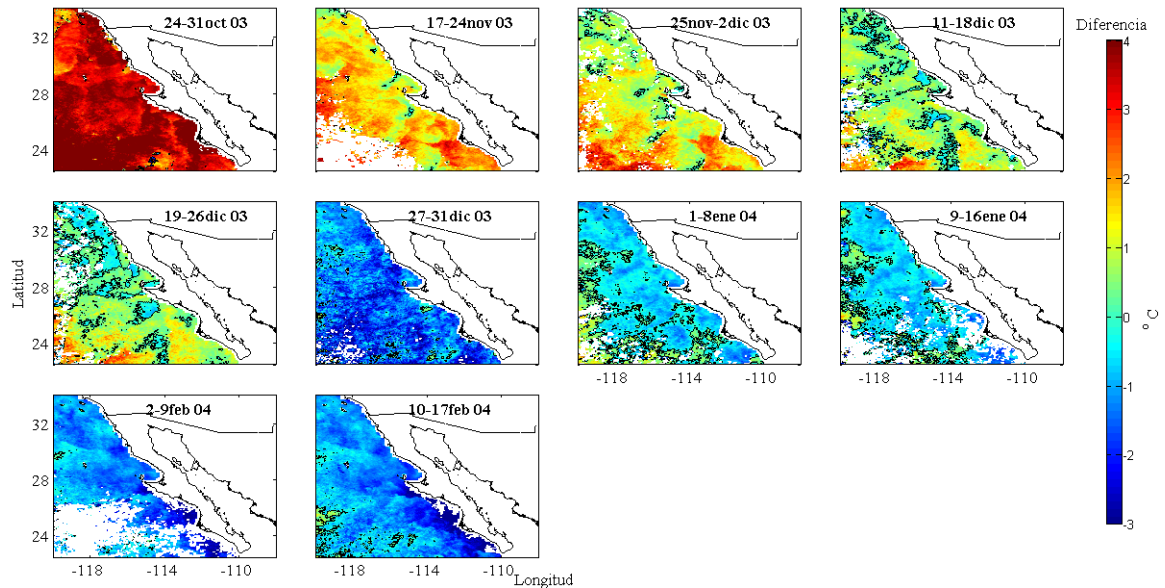


Figura 32. Diferencias entre TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 °C).

El patrón espacio-temporal de las diferencias de CHL en presencia de viento Santa Ana mostró diferencias negativas asociadas a la zona costera desde finales de octubre hasta mediados de enero. En febrero de 2004 se observaron las mayores diferencias positivas ($\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$) a lo largo de la costa (Fig. 34).

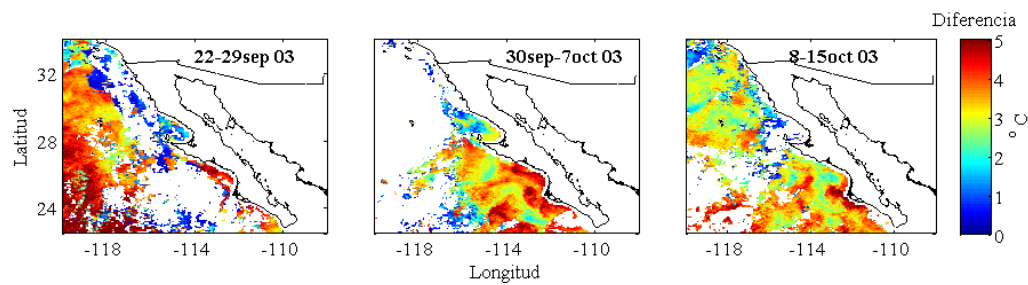


Figura 33. Diferencias entre TSM sin viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 °C).

Las diferencias de CHL para fechas sin viento Santa Ana muestran diferencias positivas asociadas a la costa desde $\sim 27^\circ\text{N}$ hacia el norte y diferencias negativas desde esa misma latitud hacia el sur (Fig. 35).

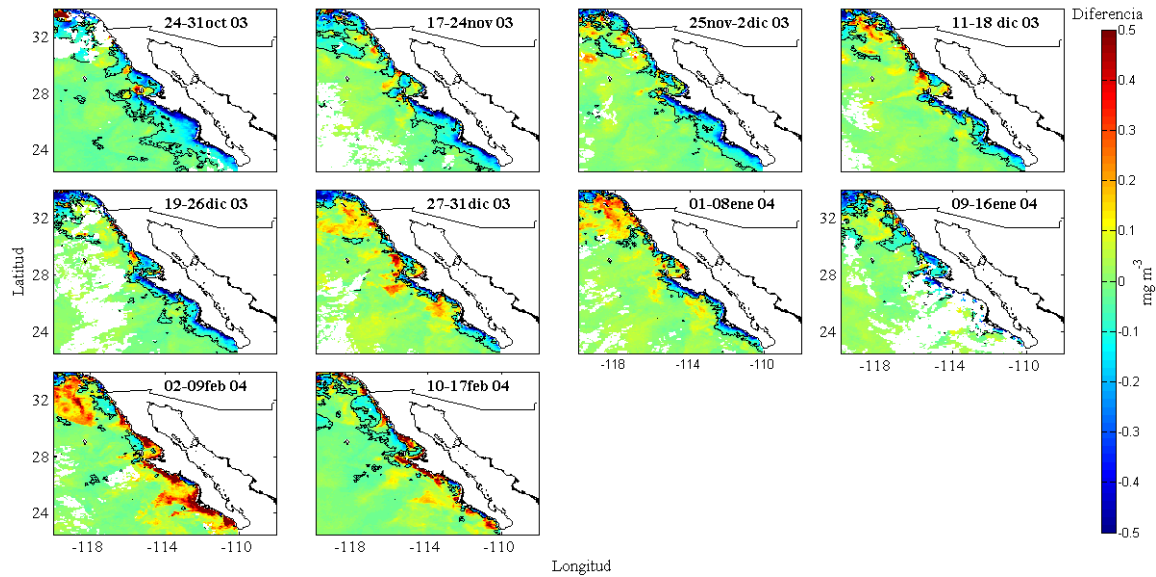


Figura 34. Diferencias entre CHL con viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).

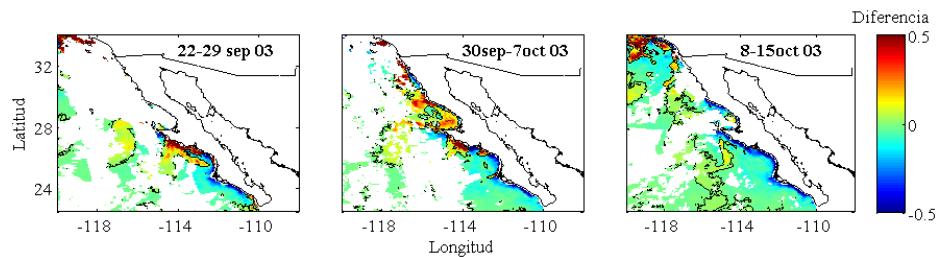


Figura 35. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula (0 mg m^{-3}).

El patrón general de las diferencias de PP para los períodos con viento Santa Ana fue similar al de CHL. Se observaron diferencias negativas entre -200 y $-500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ asociados a la costa, desde finales de octubre hasta mediados de enero y diferencias

positivas ($>250 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) al sur de 28°N especialmente en febrero del 2004. Además, por debajo de 28°N se observaron filamentos de diferencias mayores a $150 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ con dirección suroeste (Fig. 36).

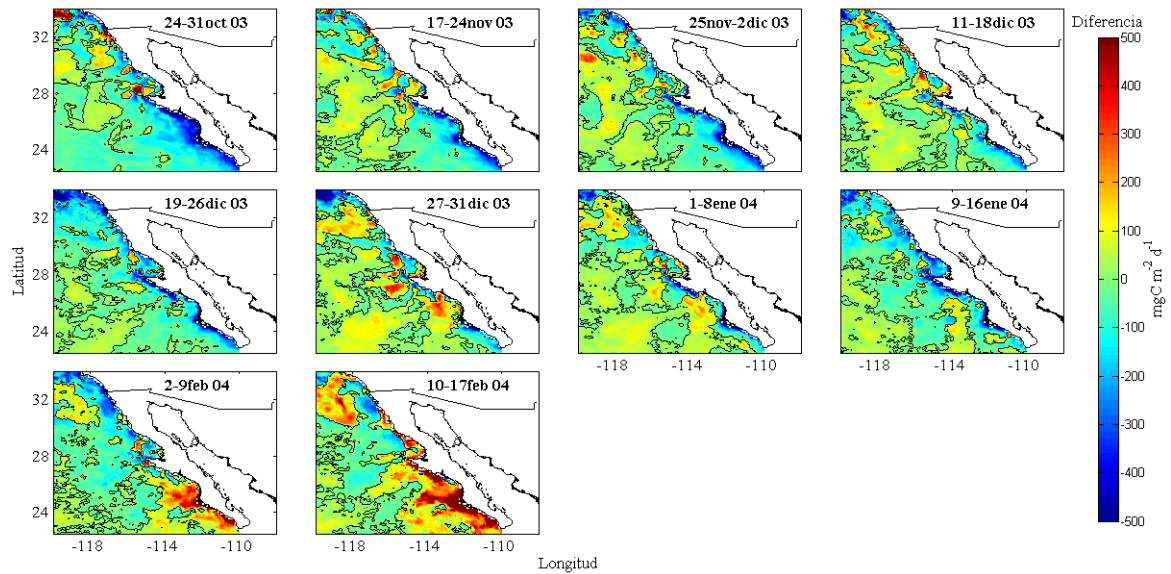


Figura 36. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

En las fechas sin viento Santa Ana se observó una mayor cobertura espacial de diferencias positivas, especialmente franjas paralelas a la costa sobre los 28°N (Fig. 37). Por debajo de esta latitud destaca la presencia de filamentos hacia el suroeste de diferencias positivas ($\sim 100 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

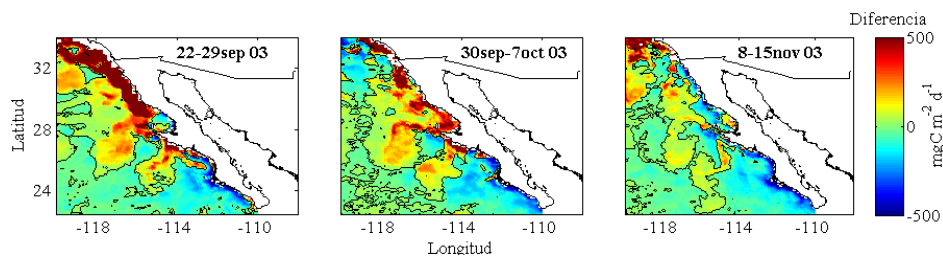


Figura 37. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 3. La línea de contorno corresponde a la diferencia nula ($\text{mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

El resultado del análisis de conglomerado para las fechas con y sin viento Santa Ana del análisis anterior, asoció las fechas en tres grupos (Fig. 38). En el dendograma se observó que las fechas se ordenaron cronológicamente de derecha a izquierda, observándose al comienzo las imágenes sin viento Santa Ana (g3). Este grupo se caracterizó por presentar los mayores promedios de TSM y CHL. El grupo 2 (g2) asoció las fechas con viento Santa Ana (S3-S12), con promedios de TSM y CHL de 20.42 °C y 0.23 mg m⁻³, respectivamente. En g1 se agruparon las últimas cinco imágenes del periodo 3, caracterizándose por presentar la menor temperatura de los grupos (17.45 °C) y CHL intermedia (0.28 mg m⁻³) (Tabla 12).

La correlación entre los promedios de TSM y CHL para las fechas con viento Santa Ana fue estadísticamente significativa ($r=-0.88$; $p= 0.01$), con una relación inversa entre las variables.

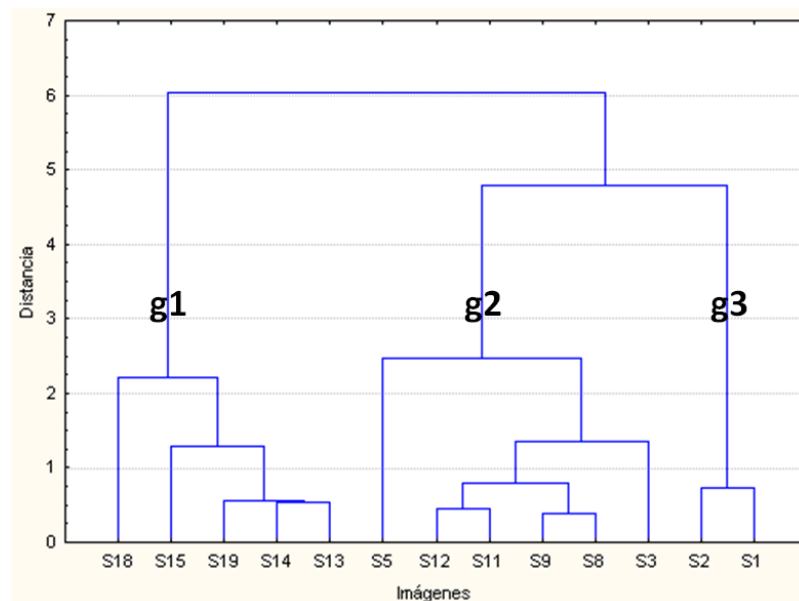


Figura 38. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de TSM y CHL para las fechas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 3. S1= 22-29sep 2003; S2= 30sep-7oct 2003; S3=8-15oct 2003; S5= 24-31oct 2001; S8= 17-24nov 2003; S9=25nov-2dic 2003; S11= 11-18dic 2003; S12= 19-26dic 2003; S13= 27-31dic 2003; S14= 1-8ene 2004; S15= 9-16ene 2004; S18= 2-9feb 2004; S19= 10-17feb 2004.

Tabla 12. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; n= número de datos; prom= promedio; error=error estándar.

grupos (ns)	TSM (°C)		CHL (mg m ⁻³)	
	pro (n)	error	prom (n)	error
g1 (5)	17.45 (164065)	0.0055	0.28 (174376)	0.0009
g2 (6)	20.42 (184374)	0.0065	0.23 (197825)	0.0006
g3 (2)	21.85 (40637)	0.0137	0.31 (30987)	0.0031

3.3.2 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa

El intervalo de TSM a lo largo de la costa fue entre 10 y 29 °C. La distribución temporal de TSM mostró variación estacional, con valores mayores en otoño y menores TSM en invierno. Se observó disminución de TSM a lo largo de la costa a finales de septiembre, noviembre, diciembre, mediados de enero, principios de febrero y mediados de marzo. La primera y última fecha no coincidieron con eventos Santa Ana (Fig. 39).

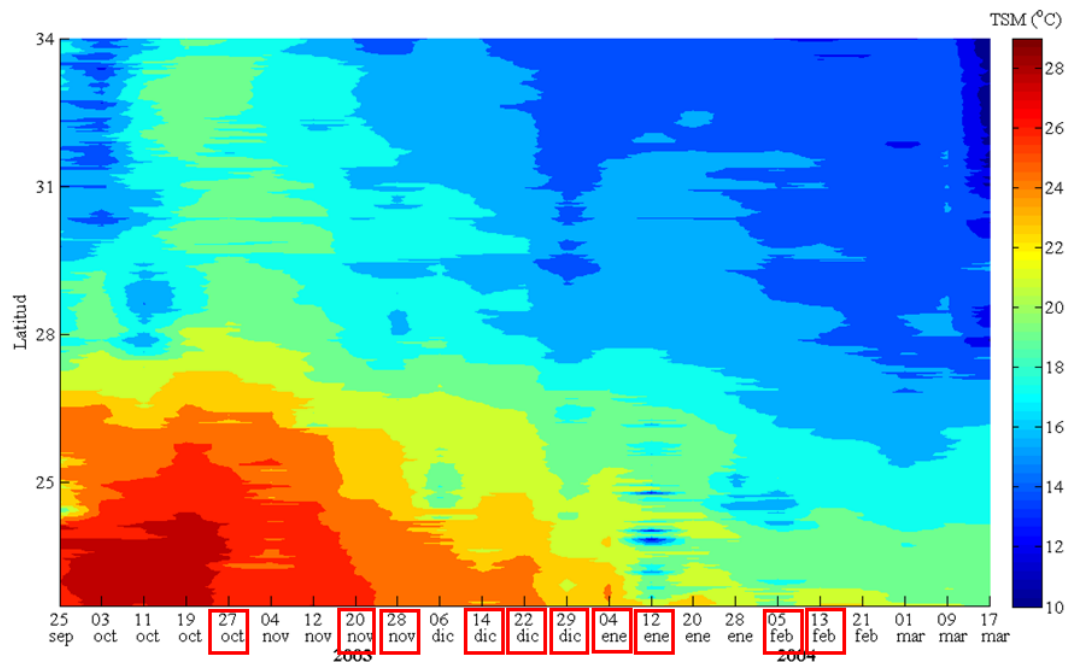


Figura 39. Diagrama Hovmöller semana-latitud de TSM para el periodo 3. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

La CHL a lo largo de a costa presentó valores entre 0.1 y 6.0 mg m^{-3} . Valores mayores a 3.0 mg m^{-3} estuvieron restringidos a ciertas zonas y períodos: $\sim 27^\circ\text{N}$ y sobre los 32°N a finales de septiembre, al sur de 27°N y 33.5°N desde febrero hasta marzo. A lo largo de la costa se observó aumento en la CHL ($\sim 1 \text{ mg m}^{-3}$) coincidente con viento Santa Ana a principios de febrero. Se visualizaron líneas horizontales continuas a través del tiempo de CHL $\sim 1.5 \text{ mg m}^{-3}$ a los 27, 28, ~ 30 y 33.5°N (Fig. 40).

La PP a lo largo de la costa varió entre ~ 400 y $3500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. El diagrama Hovmöller muestra valores mayores a $2000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ al inicio y final del periodo de estudio sobre 26°N y al sur de 28°N , respectivamente. Se observó aumento de PP a lo largo de la costa en fechas con viento Santa Ana a mediados de noviembre, diciembre y en febrero. En esta última fecha el aumento en la PP fue más evidente. Valores de PP de $\sim 1500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ se mantuvieron constantes en el tiempo a 27, 28, $\sim 30^\circ\text{N}$ y 33.5°N (Fig. 41).

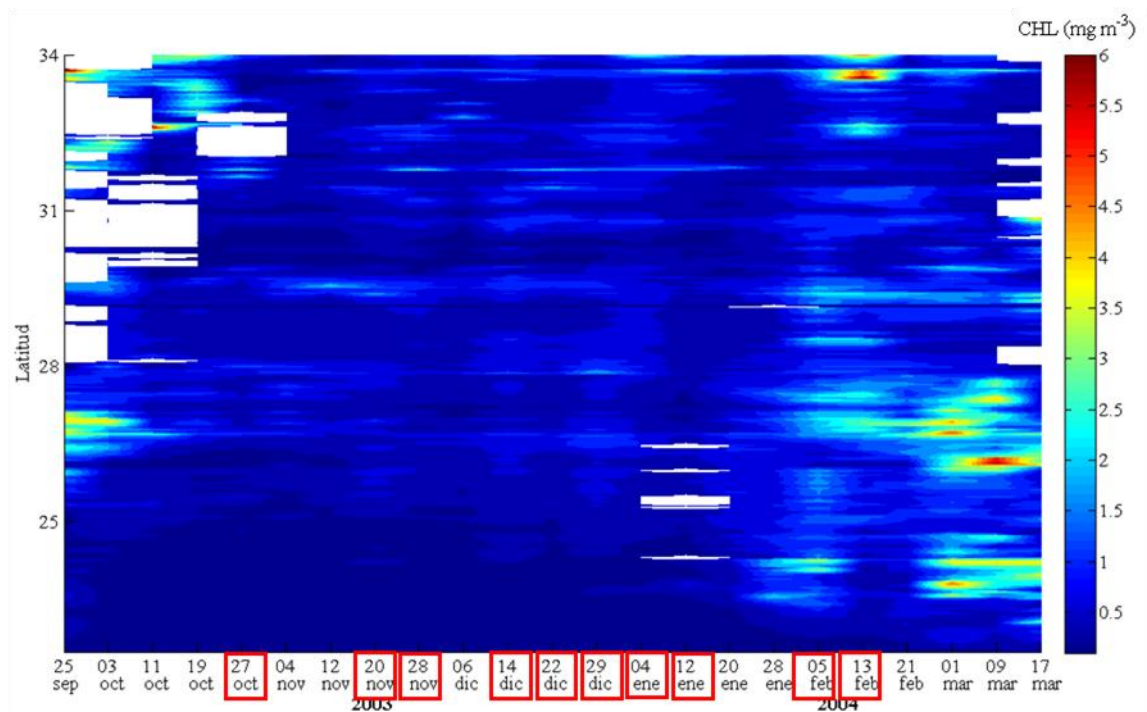


Figura 40. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL para el periodo 3. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

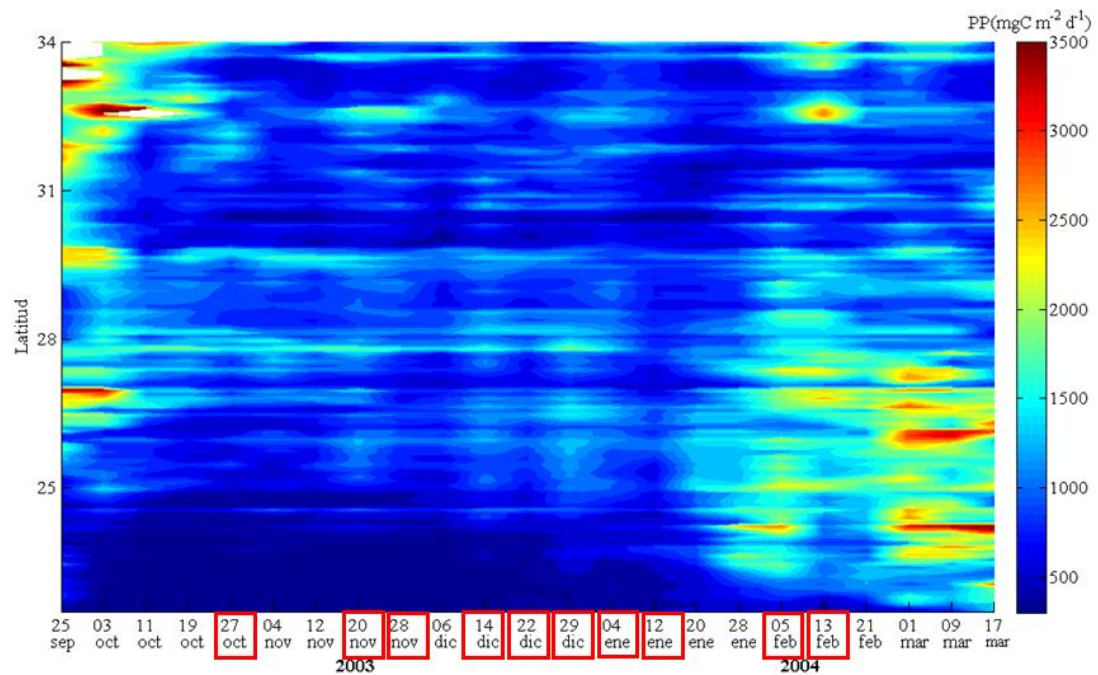


Figura 41. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP para el periodo 3. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

3.3.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada

En general, los promedios de TSM en la cuadrícula muestran tendencia a disminuir en el tiempo. La TSM promedio fluctuó entre ~ 16 y 23 °C, con el valor máximo a mediados de octubre y el mínimo a finales de enero (Fig. 42a). El intervalo de los promedios de CHL en la cuadrícula fue de 0.15 a ~ 0.25 mg m^{-3} , con el mínimo a mediados de octubre y de enero y máximos relativos a finales de diciembre (0.2 mg m^{-3}), principio de febrero (~ 0.2 mg m^{-3}) y a principios de marzo (~ 0.25 mg m^{-3}) (Fig. 42b). La variación temporal de PP fue similar a la CHL y fluctuó entre 400 y ~ 550 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Se observaron máximos relativos a finales de noviembre, en diciembre y a principios de febrero (Fig. 42c).

Al relacionar las variables con fechas donde hubo viento Santa Ana, en general no se observó el mismo comportamiento: a finales de octubre la TSM aumentó y disminuyeron la CHL y la PP. Se observaron aumentos en la CHL y la PP a finales de diciembre asociado a un decremento en la TSM. Al inicio de febrero se observó un aumento en la CHL, PP y TSM (Fig. 42).

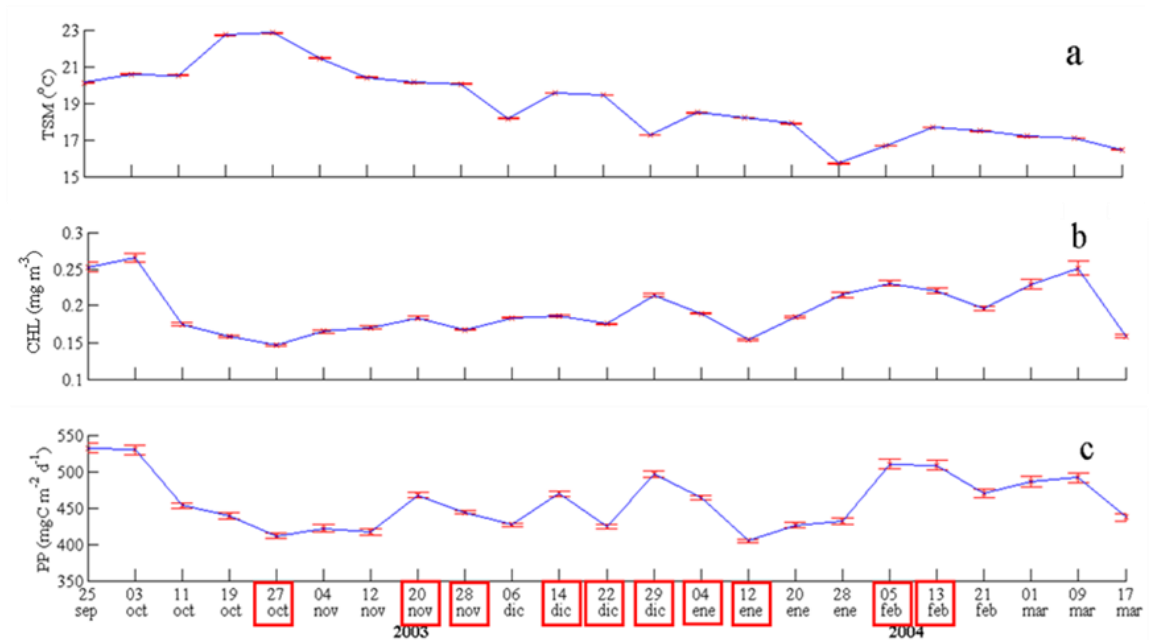


Figura 42. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 3 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

El análisis de conglomerados considerando el promedio de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada separó las fechas con viento Santa Ana en tres grupos (Fig. 43). Las características de los grupos se listan en la Tabla 13. El grupo 1 se caracterizó por asociar la menor TSM, mayor CHL y mayor magnitud promedio del viento en la cuadrícula seleccionada. La mayor TSM promedio y los menores promedios de CHL y magnitud del viento fueron registrados en el grupo 1 (Tabla 13).

La correlación entre los promedios de TSM y CHL para las fechas con viento Santa Ana para la cuadrícula seleccionada fue estadísticamente significativa ($p=0.007$).

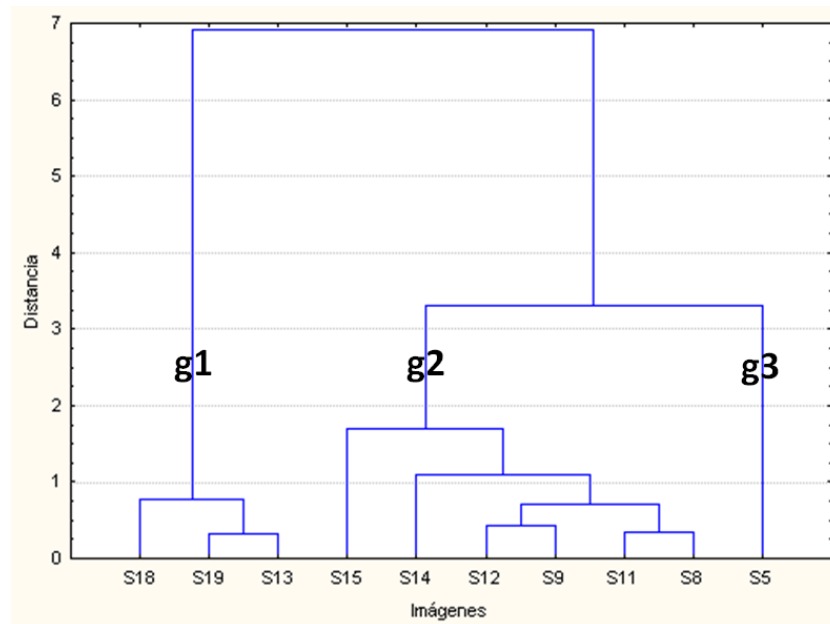


Figura 43. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 3. S5= 24-31oct 2003; S8= 17-24nov 2003; S9= 28nov-2dic 2003; S11= 11-18dic 2003; S12= 19-26dic 2003; S13=27-31dic 2003; S14= 1-8ene 2004; S15= 9-16ene 2004; S18= 2-9feb 2004; S19= 10-17feb 2004.

Tabla 13. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 3. ns= número de semanas; número de datos; prom= promedio; error= error estándar.

grupos (ns)	TSM ($^{\circ}\text{C}$)		CHL (mg m^{-3})		Magnitud del viento (m s^{-1})	
	prom (n)	error	prom (n)	error	prom (n)	error
g1 (3)	17.22 (23998)	0.0097	0.22 (24740)	0.0020	6.57 (296)	0.1237
g2 (6)	19.31 (49384)	0.0065	0.18 (44119)	0.0005	6.39 (518)	0.0737
g3 (1)	22.83 (8253)	0.0126	0.15 (8505)	0.0014	4.64 (74)	0.1062

3.4 Periodo 4: 21 septiembre de 2004- 21 de marzo de 2005

3.4.1 Determinación de las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana

En este periodo de estudio la disminución de HR fue más notoria en la estación Ensenada, aunque las variaciones fueron coincidentes en las otras estaciones pero en menor magnitud. La HR menor a 50% fue observada durante todo el periodo de estudio, pero no de forma

continua (Fig. 44). Las disminuciones de HR registradas a principio y final del periodo de estudio no se consideraron como evento Santa Ana, debido a que no coincidieron con la presencia de viento proveniente del primer cuadrante (Fig. 44 y 45).

Para el periodo 4 se cuantificaron seis eventos Santa Ana. La duración del viento Santa Ana varió mensualmente, en noviembre fue dos días, en diciembre tres días y de un día los registrados en enero y febrero (Tabla 14).

Las magnitudes del viento en este periodo variaron entre 1 y 13 m s^{-1} . Se observó cobertura espacial del viento Santa Ana en toda el área de estudio los días 2 noviembre, 30 noviembre, 17 diciembre, 24 de diciembre de 2004 y 19 de enero del 2005. En esta última fecha se registró la menor magnitud del periodo de estudio (promedio 3 m s^{-1}). La máxima extensión del viento Santa Ana fue de ~ 900 km, observada desde Punta Eugenia (28°N) hasta 22.5°N - 120°W (Fig. 45).

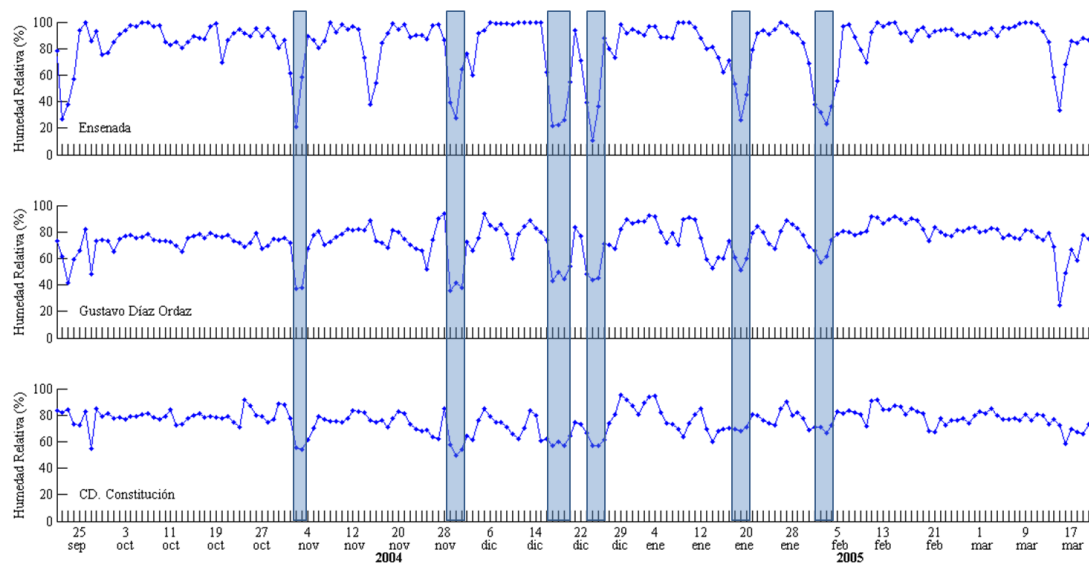


Figura 44. Variación de la Humedad Relativa (%) para el periodo 4 en las estaciones meteorológicas. El área sombreada indica las fechas de ocurrencia de eventos Santa Ana considerando porcentaje de HR menor a 50%.

Tabla 14. Eventos Santa Ana registrados para el análisis del periodo 4.

Evento	Fechas HR	Fechas de viento Santa Ana	Fechas imágenes (TSM, CHL y PP)
1	2-3 nov 2004	2-3 nov 2004	31oct-7nov 2004
2	29-31 nov 2004	29-30 nov 2004	24nov-1 dic 2004
3	17-21 dic 2004	17-19 dic 2004	10-17 dic 2004
4	23-25 dic 2004	23-25 dic 2004	18-25 dic 2004
5	18-19 ene 2005	19 ene 2005	17-24 ene 2005
6	2-4 feb 2005	3 feb 2005	2-9 feb 2005

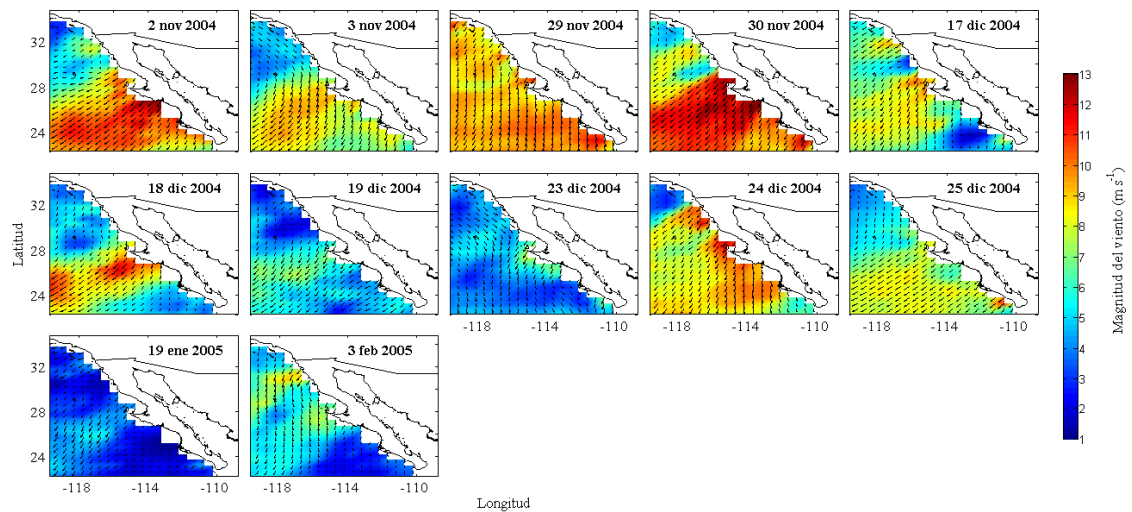


Figura 45. Campo del viento durante el periodo 4. La escala de color indica magnitud del viento (m s^{-1}).

3.4.2 Variación espacio-temporal en el área de estudio

En general, las diferencias de TSM en el área de estudio fueron desde positivas a negativas a través del tiempo, lo que concuerda con la variación estacional (Fig. 46). La primera imagen del periodo 4 presentó diferencias positivas en toda el área de estudio. En la imagen 24nov-1dic 04 se observó la aparición de diferencias negativas localizadas entre 24-29 °N, en el resto del área de estudio se observaron diferencias positivas. En las siguientes imágenes se observaron diferencias negativas de TSM en casi toda el área de estudio de diciembre a febrero (Fig 46).

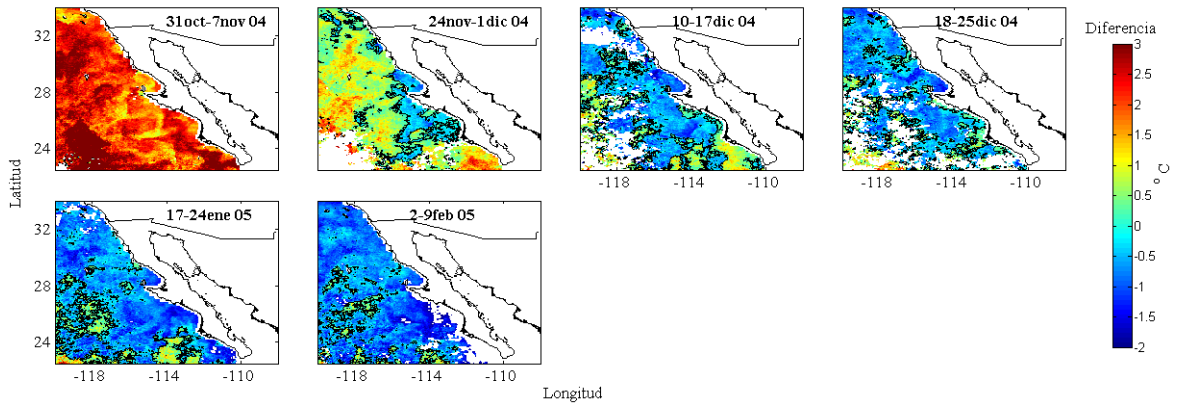


Figura 46. Diferencias entre TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 4.

En las fechas sin viento Santa Ana, se observaron diferencias positivas en toda el área de estudio, lo que indica que la TSM en cada fecha fue mayor que la TSM promedio del periodo 4 (Fig. 47).

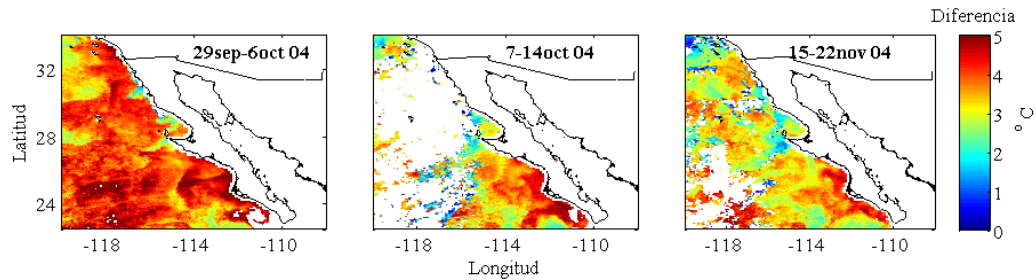


Figura 47. Diferencias entre TSM con viento Santa Ana y la TSM promedio del periodo 4.

Las diferencias negativas de CHL en el área de estudio en las fechas con viento Santa Ana estuvieron restringidas a la zona cercana a la costa. Se observaron diferencias positivas ($> 0.2 \text{ mg m}^{-3}$) entre 24-28°N, especialmente como filamentos en dirección suroeste entre finales de octubre y diciembre del 2004 (Fig. 48).

En las imágenes sin presencia de viento Santa Ana las diferencias negativas de CHL se observaron a lo largo de la costa (Fig. 49).

En general, en las fechas con viento Santa Ana se observó mayor cobertura espacial de diferencias positivas de PP ($> 100 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) que diferencias negativas (entre -100 y -

200 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$). En las imágenes correspondientes al 2004 destaca la presencia de filamentos con dirección suroeste de las máximas diferencias registradas ($>250 \text{ mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) entre 24-34°N (Fig. 50).

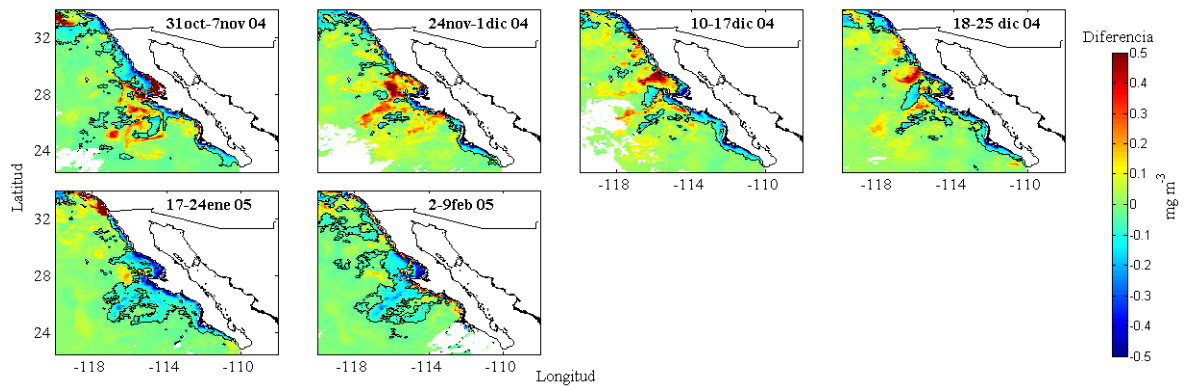


Figura 48. Diferencias entre CHL con viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 4.

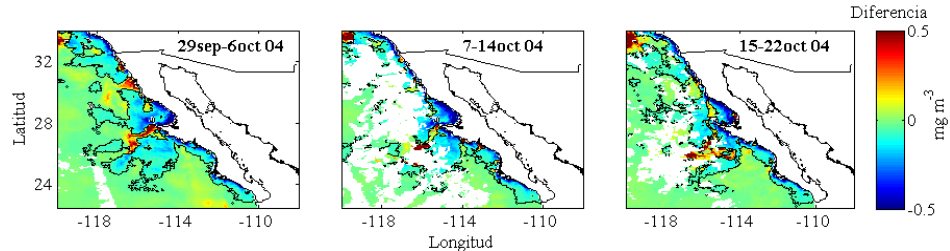


Figura 49. Diferencias entre CHL sin viento Santa Ana y la CHL promedio del periodo 4.

El patrón de diferencias de PP para las imágenes sin viento Santa Ana es similar al de las primeras fechas de la figura 50, destacando la presencia de filamentos con valores positivos ($>250 \text{ mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) entre 24-28 °N (Fig. 51).

La figura 52 muestra los tres grupos resultantes del análisis de conglomerados para las fechas con y sin viento Santa Ana del análisis anterior (g1, g2 y g3). Las fechas se ordenaron cronológicamente de derecha a izquierda. En g1 se agruparon las últimas semanas en las que se observó viento Santa Ana (S12-S18), con los promedios de TSM y

CHL para este grupo de $18.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.22 mg m^{-3} , respectivamente. En el grupo 2 (g2) se asociaron las primeras tres imágenes donde hubo viento Santa Ana. La TSM y CHL promedio de este grupo fueron $19.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.26 mg m^{-3} , respectivamente. En g3 se agruparon las fechas sin viento Santa Ana (S1-S3). Este grupo se caracterizó por presentar la máxima TSM promedio ($22.48\text{ }^{\circ}\text{C}$) y el menor promedio de CHL (0.21 mg m^{-3}). Los grupos g1 y g2 presentaron CHL mayores y TSM menores que en g3 (Tabla 15).

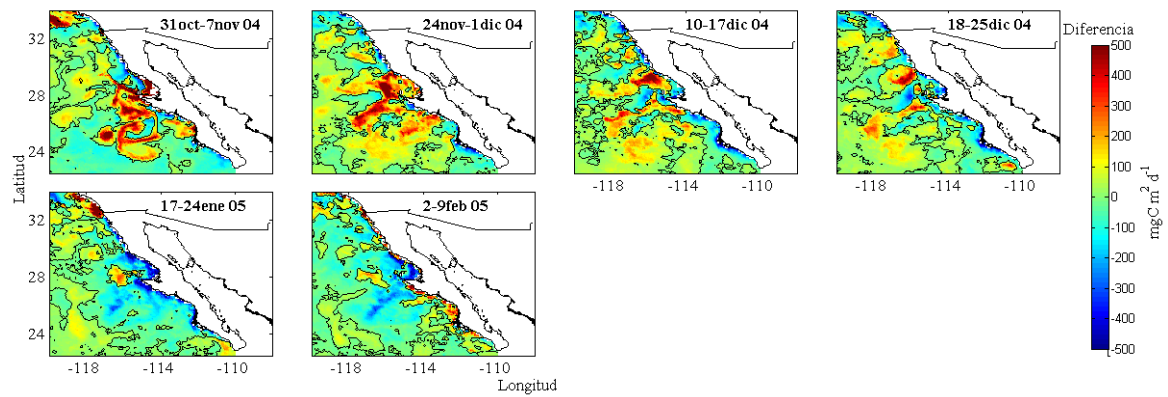


Figura 50. Diferencias entre PP con viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 4.

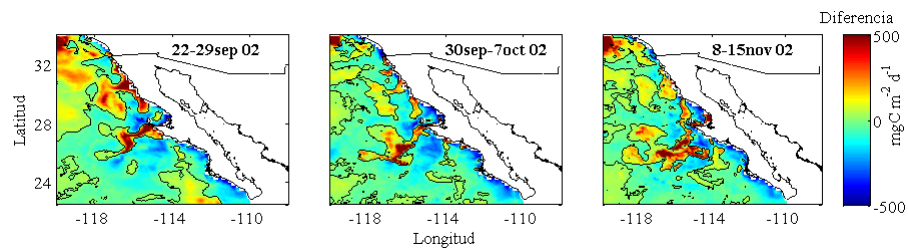


Figura 51. Diferencias entre PP sin viento Santa Ana y la PP promedio del periodo 4.

Al realizar el análisis de correlación entre los promedios de TSM y CHL del área de estudio para las fechas con viento Santa Ana no se obtuvo una relación estadísticamente significativa ($p=0.406$).

Tabla 15. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados para el área de estudio. ns= número de semanas; n= número de datos; prom= promedio; error=error estándar.

grupos (ns)	TSM (°C)		CHL (mg m ⁻³)	
	pro (n)	error	prom (n)	error
g1 (3)	18.18 (99885)	0.0064	0.22 (111781)	0.0010
g2 (3)	19.55 (98433)	0.0084	0.26 (104104)	0.0010
g3 (3)	22.48 (81055)	0.00082	0.21(83095)	0.0011

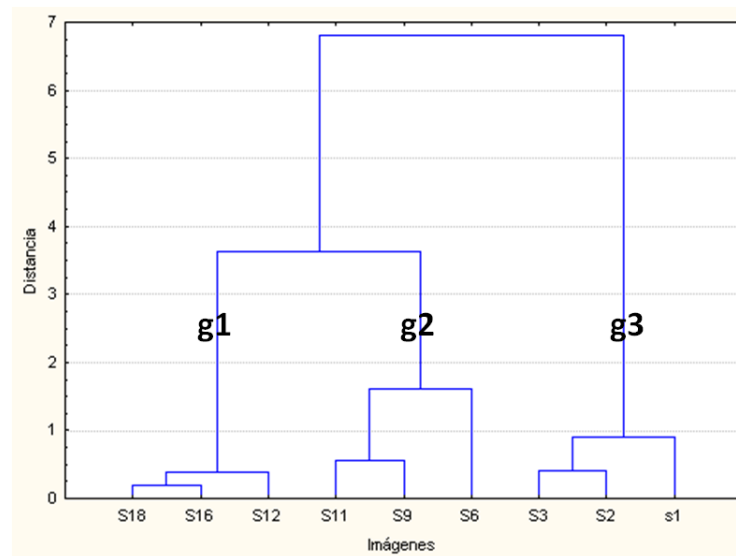


Figura 52. Análisis de conglomerados obtenido con datos promedios de CHL y TSM para las semanas con y sin viento Santa Ana durante el periodo 4. S2= 29sep-6oct 2004; S3=7-14oct 2004; S4= 15-22oct 2004; S6= 31oct-7nov 2004; S9=24nov-1dic 2004; S11= 10-17dic 2004; S12= 18-25dic 2004; S16= 17-24ene 2005; S18= 2-9feb 2005.

3.4.3 Variación espacio-temporal a lo largo de la costa

La TSM a lo largo de la costa para el periodo 4 fluctuó entre 10 y 28 °C. En general, se observaron mayores temperaturas a principios del periodo de estudio (otoño) y menores en invierno, especialmente al sur de 28 °N (Fig. 53). A lo largo de la costa se observó la disminución de TSM de ~2 °C respecto a la temperatura de fechas aledañas durante principios de octubre, finales de diciembre y mediados de marzo. Sin embargo, ninguna de estas fechas concuerda con viento Santa Ana (Fig.53).

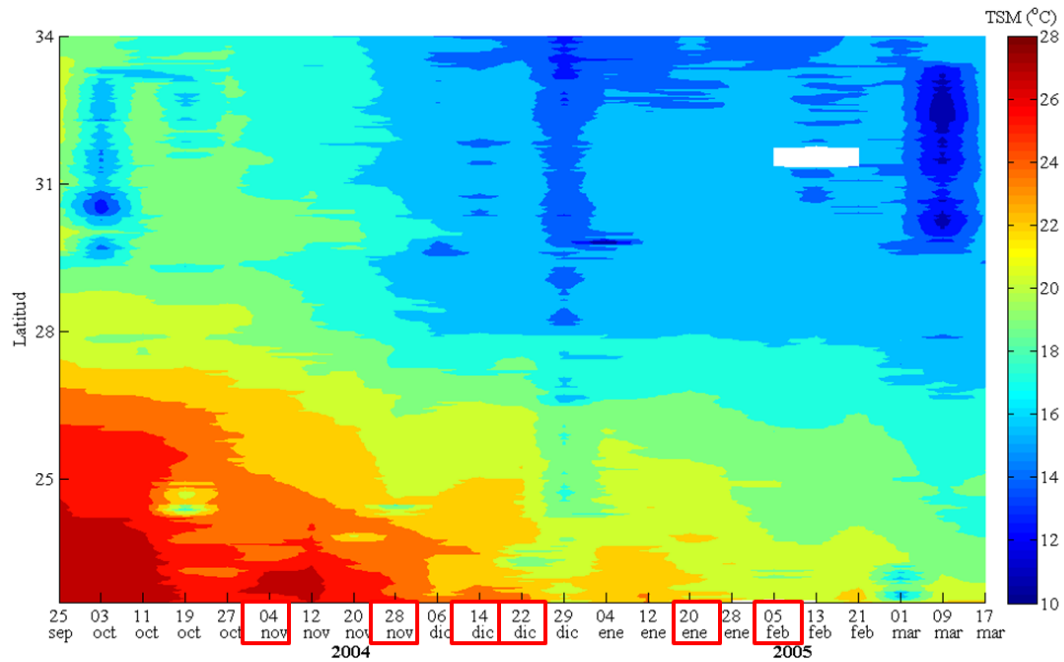


Figura 53. Diagrama Hovmöller semana-latitud de TSM, para el periodo 4. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

La variación temporal de CHL a lo largo de la costa registró valores entre 0.1 y 6.0 mg m^{-3} . Los valores de CHL mayores a 3.0 mg m^{-3} se observaron como núcleos ubicados entre 28 - 29°N a finales de octubre, $\sim 33^\circ\text{N}$ a mediados de enero y a lo largo de la costa las últimas semanas del periodo de estudio. Se observó aumento de CHL a lo largo de la costa de $\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$ respecto a las fechas próximas, a principios de febrero, fechas que coincidieron con viento Santa Ana. Valores de CHL de aproximadamente 1.5 mg m^{-3} se mostraron como líneas continuas en el tiempo a 27 , 28 , ~ 30 , 31 y 33.5°N (Fig. 54).

La distribución de PP a lo largo de la costa presentó un comportamiento similar a la CHL (Fig. 55). El intervalo de PP fluctuó entre 500 y $3500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Se observaron núcleos con valores mayores a $2000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ entre finales de septiembre y mediados de noviembre centrado a $\sim 28^\circ\text{N}$, a finales de enero sobre los 33°N y a lo largo de la costa a finales del periodo de estudio. Además, se observaron líneas continuas en el tiempo de valores $\sim 1200 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a 28 , 30 y 33°N (Fig. 55).

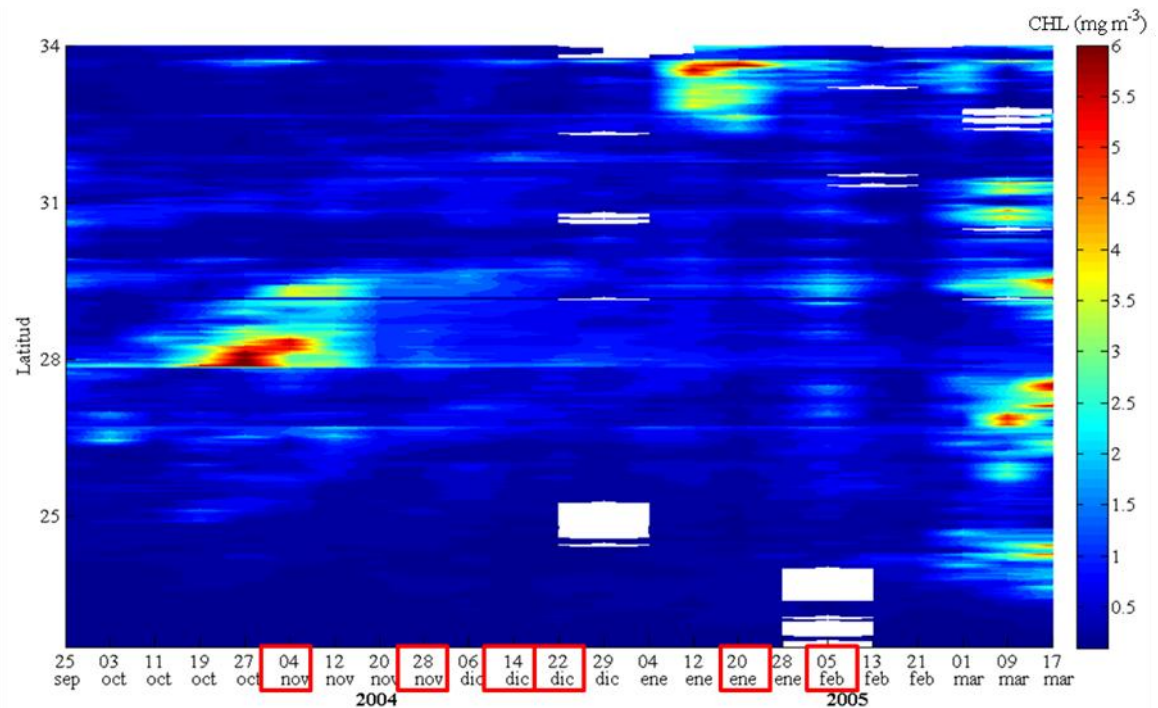


Figura 54. Diagrama Hovmöller semana-latitud de CHL, para el periodo 4. Los espacios en blanco son datos faltantes. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

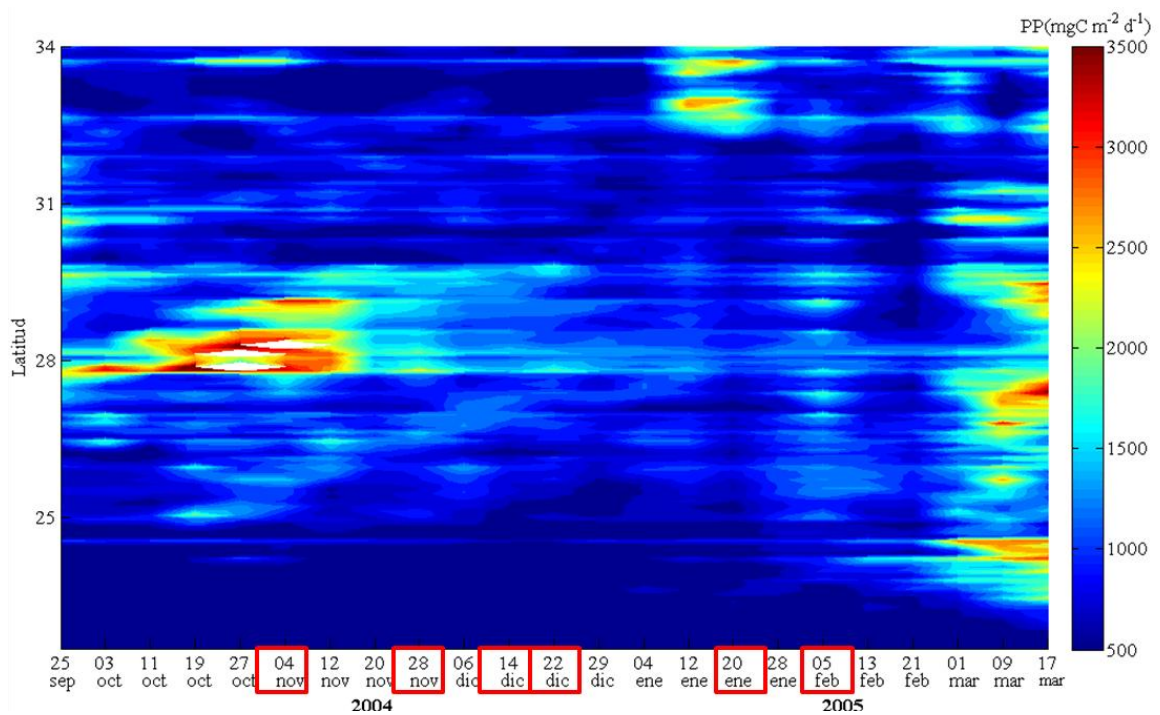


Figura 55. Diagrama Hovmöller semana-latitud de PP, para el periodo 4. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

3.4.4 Variación espacio-temporal en la cuadrícula seleccionada

La distribución de los promedio de TSM en la cuadrícula seleccionada varió entre 16 y 23 °C, con tendencia a disminuir en el tiempo. Se observaron tres mínimos relativos de TSM a principios de octubre, finales de diciembre y principios de marzo (Fig. 56a). El intervalo de CHL para la cuadrícula fue entre ~ 0.1 y 0.35 mg m^{-3} , con cuatro máximos relativos a mediados de octubre, principio de diciembre, mediados de enero y principio de marzo (Fig. 56b). En la figura 56c se observa la distribución de PP en la cuadrícula seleccionada, la cual mostró un comportamiento similar a la CHL. La PP varió entre 400 y $\sim 650 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y mostró la tendencia general a disminuir en el tiempo.

En general, en fechas con viento Santa Ana se observó disminución en las tres variables a excepción de finales de noviembre donde se observó disminución de TSM y aumento de CHL y PP (Fig. 56).

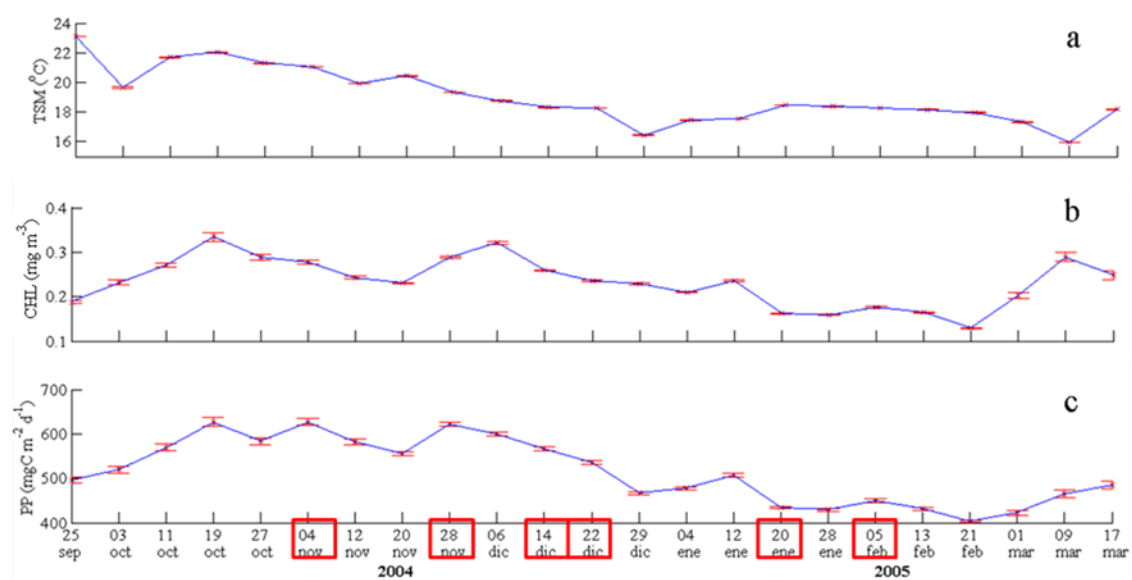


Figura 56. Variación temporal del promedio para la cuadrícula seleccionada durante el periodo 4 (a) TSM; (b) CHL; (c) PP. Las barras representan el error estándar. Las fechas en el eje x corresponden al día medio de cada imagen. Los cuadros rojos indican fechas de ocurrencia de viento Santa Ana.

El análisis de conglomerado de fechas con viento Santa Ana asoció cuatro grupos, con un orden cronológico de derecha a izquierda (Fig. 57). Los dos primeros grupos (g1 y g2) se

constituyeron de dos imágenes y g3-g4 de una imagen cada grupo. En la tabla 16 se listan las características de los grupos resultantes. Las características de los grupos 3 y 4 fueron similares, con los mayores promedios de magnitud del viento, CHL y TSM. El grupo 2 presentó promedios de 18.29 °C, 0.25 mg m⁻³ y magnitud del viento promedio de 7.23 m s⁻¹. En el grupo 1 se asociaron las últimas fechas con presencia de viento Santa Ana del periodo 4 y se caracterizó por presentar la menor magnitud del viento y el menor promedio de CHL (Tabla 16).

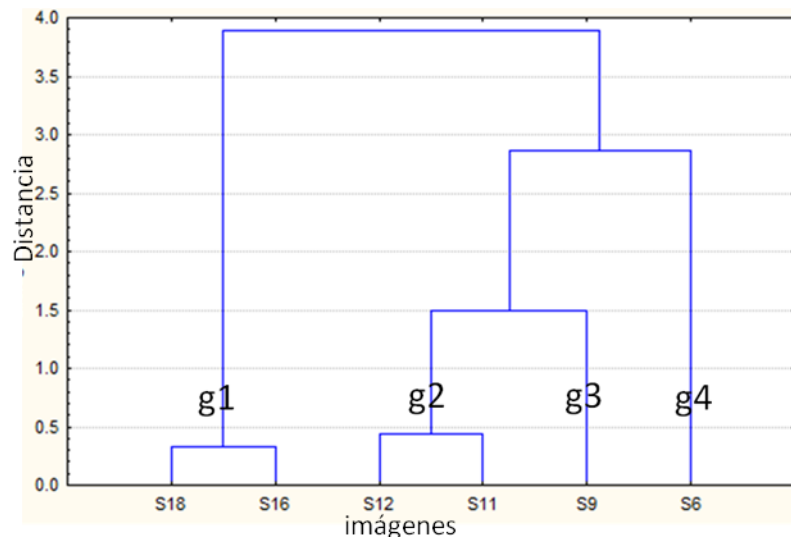


Figura 57. Análisis de conglomerados obtenido con promedios de TSM y CHL de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 4. S6= 31-7nov 2004; S9= 24nov-1dic 2004; S11= 10-17dic 2004; S12= 18-25dic 2004; S16= 17-24ene 2005; S18= 2-9feb 2005.

La correlación entre los promedios de TSM y CHL para las fechas con viento Santa Ana no fue estadísticamente significativas ($p=0.23$).

Tabla 16. Características generales de los grupos resultantes del análisis de conglomerados de la cuadrícula seleccionada en las fechas con viento Santa Ana del periodo 4. ns= número de semanas; número de datos; prom= promedio; error= error estándar.

grupos (ns)	TSM (°C)		CHL (mg m ⁻³)		Magnitud del viento (m s ⁻¹)	
	prom (n)	error	prom (n)	error	prom (n)	error
g1 (2)	18.38 (16506)	0.0058	0.17 (17018)	0.0013	4.34 (148)	0.1281
g2 (2)	18.29 (16505)	0.0110	0.25 (16547)	0.0013	7.23 (444)	0.0920
g3 (1)	19.34 (8245)	0.0105	0.29 (8222)	0.0023	10.41 (148)	0.1141
g4 (1)	21.05 (8253)	0.0103	0.28 (8482)	0.0039	9.29 (148)	0.1068

4. Discusión

El viento frente a la Península de Baja California presenta dirección predominante hacia el sur-sureste la mayor parte del año, observándose más intenso en primavera-verano que en otoño-invierno como respuesta a los cambios estacionales del Centro de Alta Presión del Pacífico Norte (Castro y Martínez, 2010). Así mismo en esa misma zona, durante otoño-invierno destaca la condición climática conocida como Santa Ana (Raphael, 2003), caracterizada por el aumento en la magnitud del viento proveniente del primer cuadrante, disminución en la humedad relativa (HR), presencia de gradiente local de presión atmosférica (entre la alta presión cerca de la Gran Cuenca y la baja presión frente a la Península de Baja California) e incremento en la temperatura ambiental.

En este trabajo se estableció como criterio de identificación de condición Santa Ana la presencia de HR menor a 50% (datos estaciones meteorológicas) y viento proveniente del noreste (imágenes satelitales). No obstante, en algunas fechas la HR disminuyó y el viento Santa Ana no fue observado en el océano (Fig. 47), lo cual se puede deber a que en esas fechas el viento Santa Ana sólo fue percibido en el continente no alcanzó a influir en la región oceánica del área de estudio. Situación similar fue observada por Castro *et al.* (2006), quienes registraron en una estación meteorológica cambios en HR (de 90 a 30%) y temperatura ambiental (de 10 a ~ 14 °C) pero no en el viento (condiciones normales 2.7 m s^{-1} , condiciones Santa Ana 2.3 m s^{-1}), sugiriendo que la altitud de las montañas ($>1500 \text{ m}$) dificultó el paso del viento.

Tomando en cuenta los cuatro periodos de estudio, los eventos Santa Ana en general se registraron entre noviembre y febrero. El mes con mayor frecuencia fue diciembre y los promedios de frecuencia de evento por año y días por evento fueron 12 y 1.5 respectivamente. Estos resultados coinciden con las estadísticas efectuadas por Raphael (2003), excepto en la frecuencia de eventos por año, quien reportó 20 eventos para el periodo 1968-2000. La disminución del número de eventos Santa Ana por año puede ser explicada por dos planteamientos: el primero propone que hay una posible relación entre la disminución de eventos y la presencia del fenómeno El Niño (Raphael, 2003; Finley y

Raphael, 2007) y el segundo plantea una baja en los eventos Santa Ana a largo plazo, debido al efecto del calentamiento global en la disminución del gradiente de temperatura entre las zonas áridas continentales y el océano (Hughes y Hall, 2010; Hughes *et al.*, 2011). La explicación de la disminución de eventos por efectos de El Niño se podría aplicar en este trabajo, ya que parte del periodo de estudio (2002-2005) tuvo un MEI positivo (Índice Multivariado ENSO) sobre todo a partir de la primavera de 2002 (Fig. 58).

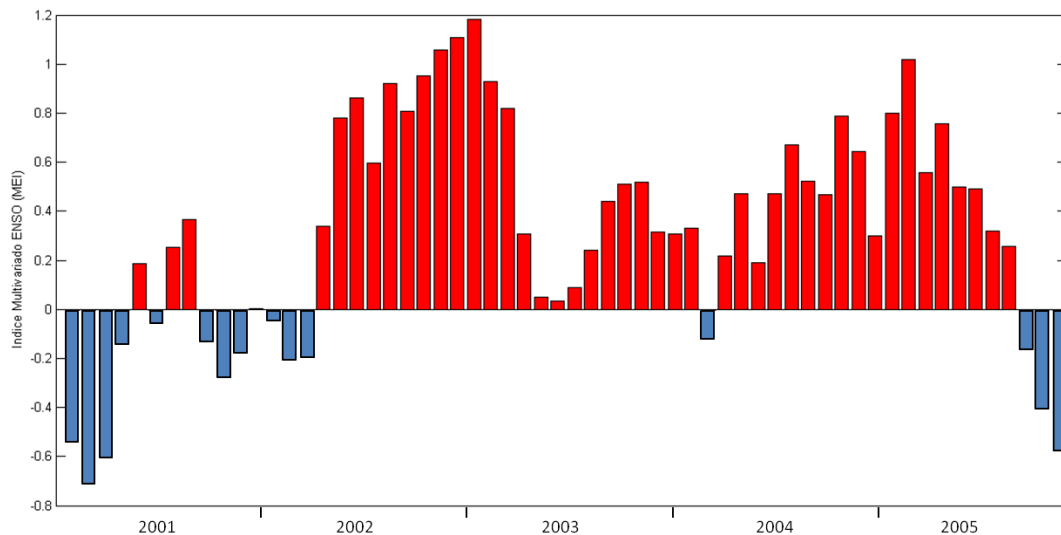


Figura 58. Índice Multivariado ENSO (MEI) para el periodo de estudio (2001-2005). Valores positivos indican condición El Niño y valores negativos condición La Niña. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/mei.html>.

La distribución de viento Santa Ana en el área de estudio fue espacialmente heterogénea, con eventos donde el viento cubrió el área de estudio, mientras que en otros difícilmente fue (Fig. 3, 17, 31 y 45). Se sugiere que esta variabilidad se debe a la posición del centro de alta presión en el continente, ya que mientras más al norte se ubique de la Gran Cuenca (Estados Unidos) se esperaría que la influencia del viento Santa Ana en el área de estudio fuera mayor.

Las mayores magnitudes de viento Santa Ana (entre $8\text{-}15\text{ m s}^{-1}$) se registraron entre $22.5\text{-}28^{\circ}\text{N}$ y $30\text{-}32^{\circ}\text{N}$. Estas zonas coinciden con baja altitud de las montañas en la Península de Baja California ($< 500\text{ m}$). Esta característica orográfica facilita el paso del viento hacia el

océano adyacente, lo cual aumenta el área de influencia y la magnitud del viento Santa Ana (Castro *et al.*, 2003; Hu y Liu, 2003; Trasviña *et al.*, 2003; Castro *et al.*, 2006).

La distribución de TSM en el área de estudio mostró variabilidad espacial y temporal. Por una parte, la variabilidad temporal de TSM representada por la transición de diferencias positivas (mayor TSM respecto al promedio) a diferencias negativas (menor TSM respecto al promedio), desde el inicio al final de cada periodo de estudio respectivamente, podría estar asociada a la diferencia de TSM entre las estaciones del año estudiadas (otoño-invierno) (Durazo *et al.*, 2010).

Por otra parte, la variación espacial de la TSM se caracterizó por la presencia progresiva de diferencias negativas a positivas desde la costa hacia la zona oceánica. Esto concuerda con características descritas por Durazo *et al.* (2010) para el área de estudio, quienes asociaron valores mínimos de temperatura cerca de la costa al agua subsuperficial transportada por surgencias costeras y máximas temperaturas lejos de la costa al calentamiento por radiación solar. La presencia de diferencias positivas de TSM en la zona oceánica (1-2 °C), además puede ser beneficiada por cielos despejados característicos de condición Santa Ana, ya que permitiría una mayor ganancia de calor por radiación en la superficie del mar y por ende mayor temperatura superficial.

Las mayores diferencias negativas de TSM (entre -2 y -3 °C) estuvieron relacionadas con viento Santa Ana con duración entre 2 y 3 días y con magnitud entre 8-15 m s⁻¹, observándose al sur de los 28 °N y también fueron registradas en algunas ocasiones en toda el área de estudio (Fig. 4, 25ene-1feb 02, 2-9 feb 02, 10-17feb 02; Fig. 18, 27-31dic02; Fig. 32, 27-31dic 03, 2-9feb 04, 10-17feb 04 ; Fig. 46, 24nov-1dic 04, 10-17dic 04, 18-25dic 04). Trasviña *et al.* (2003), plantearon al bombeo de Ekman positivo como posible mecanismo causante de la disminución de la TSM en presencia de viento Santa Ana, el cual beneficiaría el transporte vertical de agua subsuperficial más fría. Así mismo, Hu y Liu (2003) sugieren que viento Santa Ana mayor a 8 m s⁻¹ favorecería la mezcla vertical del agua superficial y en consecuencia ocurriría una disminución de la TSM. Además, se asoció la disminución de TSM a altos flujos de calor latente calculados en condición Santa

Ana (300 W m^{-2} , Trasviña *et al.* (2003); $\sim 300\text{-}500 \text{ W m}^{-2}$, Castro *et al.* (2006)), lo que indicaría flujo de calor desde la superficie del océano a la atmosfera.

En la distribución de TSM a lo largo de la costa fue posible constatar la división zonal propuesta por Durazo (2009) y Durazo *et al.* (2010), quienes consideran Punta Eugenia (28°N) como punto de separación de características oceanográficas frente a la Península de Baja California. Los resultados muestran que al norte de 28°N dominó TSM entre 12 y 17°C asociadas a aguas de origen subártico y al sur de 28°N se registraron TSM entre 18 y 28°C características de la influencia de aguas tropical y subtropical.

Durazo *et al.* (2010), muestran evidencias que en la región al norte de 28°N las surgencias costeras son persistentes a lo largo del año. En cambio al sur de 28°N las surgencias costeras ocurren principalmente en primavera y verano. Lo anterior permitiría explicar la presencia de disminuciones de TSM a lo largo de la costa a principio y final de los periodos estudiados. Sin embargo, no todos los eventos Santa Ana afectaron el descenso de TSM a lo largo de la costa. En general, la disminución de TSM a lo largo de la costa asociada a viento Santa Ana fue evidente con velocidad del viento mayor a 8 m s^{-1} y persistente por más de un día.

La tendencia general de las diferencias de CHL en el área de estudio (CHL evento Santa Ana – CHL promedio otoño-invierno) mostró valores negativos en la zona costera y positivos en la zona oceánica (Fig. 6, 20, 34, 48). Las diferencias negativas de CHL (menor CHL en evento Santa Ana respecto al promedio) se podrían explicar considerando que el promedio calculado para cada periodo de estudio incluye además de eventos Santa Ana los mecanismos que favorecen el aumento de concentración de clorofila-*a* como lo son el transporte de Ekman (surgencia costera) y rotacional del esfuerzo del viento positivo (Castro y Martínez, 2010; Macías *et al.*, 2012). Por lo tanto, se sugiere que las diferencias negativas indican que el incremento de CHL debido a estos mecanismos es mayor que el de un evento Santa Ana. Por otro lado, las diferencias positivas (mayor CHL respecto al promedio) sugieren un aumento de CHL debido a la presencia de viento Santa Ana, en especial al sur de 28°N , donde generalmente se registraron velocidades del viento mayores

a 8 m s^{-1} . Esta observación se ajusta a los resultados de Trasviña *et al.* (2003), quienes reportan bombeo de Ekman positivo (surgencia de agua subsuperficial) asociado a la presencia de viento Santa Ana. Además, Hu y Liu (2003) plantea a través de datos satelitales aumento de CHL asociado a flujos intensos de viento Santa Ana ($> 8 \text{ m s}^{-1}$).

De acuerdo a la clasificación hecha por Gaxiola-Castro *et al.* (2010) los valores de CHL a lo largo de la costa se asocian en general a condiciones mesotróficas. Sin embargo, se observó aumento de CHL ($> 1 \text{ mg m}^{-3}$, condiciones eutróficas) en algunas fechas relacionadas con presencia de viento Santa Ana y posiblemente cuando hubo surgencia costera (a principio y final de cada periodo de estudio), con $\sim 1.5 \text{ mg m}^{-3}$ y $\sim 4 \text{ mg m}^{-3}$ respectivamente. En consideración a lo anterior, se puede estimar que en presencia de surgencias costeras el aumento de clorofila en la capa superficial es mayor que cuando ocurre viento Santa Ana, aun cuando los eventos Santa Ana sean sucesivos, lo que concuerda con lo planteado por Trasviña *et al.* (2003). Esta diferencia en la CHL entre viento paralelo a la costa (surgencia costera) y viento Santa Ana se puede deber a que los primeros son más persistentes.

El aumento de CHL a lo largo de la costa asociado a vientos Santa Ana fue de $\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$. Este incremento fue registrado cuando hubo eventos Santa Ana sucesivos y con velocidad del viento mayor a 8 m s^{-1} . Por lo tanto no todos los eventos Santa Ana tienen un mismo efecto sobre el océano adyacente a la Península de Baja California, ya que la velocidad del viento es variable entre los eventos Santa Ana.

En general, los patrones de distribución espacio-temporal de PP en el área de estudio tuvieron comportamiento similar a los de CHL, con diferencias negativas asociadas a la zona costera (PP menor respecto al promedio otoño-invierno) y diferencias positivas en la zona oceánica (PP mayor respecto al promedio otoño-invierno). Sin embargo, la cobertura espacial de diferencias positivas de PP es mayor que la observada en las diferencias positivas de CHL, probablemente debido a la presencia de surgencias costeras y al efecto del rotor del viento positivo durante los periodos estudiados.

Los valores de PP a lo largo de la costa según la clasificación propuesta por Gaxiola-Castro *et al.* (2010), son representativos de condición mesotrófica. Aunque al principio y final de cada periodo, el aumento de PP pasa a la clasificación de condición eutrófica, lo que se explicaría por la presencia de surgencias costeras en esas fechas.

En fechas con presencia de viento Santa Ana PP a lo largo de costa mostró aumento de $\sim 500 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Este incremento no se observó en todos los eventos Santa Ana, sino solo en eventos sucesivos y con viento de magnitud mayor a 8 m s^{-1} . A pesar que el aumento de PP es considerable, cabe destacar que en climatologías de PP ya sean mensuales o estacionales, no se evidencia este incremento, lo que hace suponer que el efecto del viento Santa Ana es mínimo respecto a otros mecanismos de fertilización locales como las surgencias costeras y bombeo de Ekman debido a rotor positivo del esfuerzo del viento.

Con un viento Santa Ana de tres días (febrero 2002), Trasviña *et al.* (2003), relacionaron la existencia de filamentos de agua fría con velocidades de $\sim 8 \text{ m s}^{-1}$ y al bombeo de Ekman positivo. Estos autores estimaron que el viento Santa Ana puede provocar surgencias de agua subsuperficial favoreciendo la producción en el área influenciada por el viento, aunque menos importante que la surgencia costera debido a los vientos paralelos a la costa. Los resultados del presente estudio, muestran disminución de TSM, aumento de CHL y PP asociada a viento Santa Ana con velocidad mayor a 8 m s^{-1} y duración de más de un día, lo que presumiblemente se explicaría por lo planteado por Trasviña *et al.* (2003). Cabe destacar que no en todos los eventos se presentaron dichas características, probablemente debido a la diferencia en la magnitud del viento.

Además, es posible sugerir la importancia del viento Santa Ana en la productividad de la zona oceánica debido a la advección de agua más productiva desde la zona costera, lo que se corrobora por la presencia de filamentos de CHL y PP con dirección suroeste en especial al sur de 28°N , coincidentes con la máxima extensión del viento ($\sim 900 \text{ km}$). La presencia de filamentos en la distribución de TSM no fue evidente como en las variables mencionadas anteriormente.

Se estima que el efecto ecológico del viento Santa Ana sobre el ecosistema regional, estaría relacionado con el aumento en la producción primaria debido a los aportes de agua subsuperficial (ricas en nutrientes), la cual es generada por el rotacional positivo del viento (bombeo de Ekman positivo). Pese a que el aporte de nutrientes es menor debido a rotor positivo del esfuerzo del viento comparado con el de una surgencia costera (Macías et al. 2012), se ha sugerido que la surgencia debido al rotor del viento es menor y favorece al crecimiento del fitoplancton más pequeño (Rykaczewski y Checkley 2008).

Puede ser que los efectos del viento Santa Ana no hayan sido del todo evidentes en este estudio debido a la baja resolución temporal de las imágenes utilizadas respecto a la escala temporal de los eventos. Sin embargo, si se pudo obtener una buena estimación de lo que sucede en presencia de viento Santa en el área de estudio.

5. Conclusiones

En consideración a los resultados del presente estudio, se concluye que:

La variación espacial de la TSM se caracterizó por la presencia progresiva de diferencias negativas (disminución respecto al promedio) a positivas (incremento respecto al promedio) desde la costa hacia la zona oceánica. Los valores mínimos de temperatura cerca de la costa se asociaron a surgencias costeras y las máximas temperaturas lejos de la costa con el calentamiento por radiación solar.

En general, los patrones de distribución espacio-temporal de CHL y PP en el área de estudio tuvieron comportamiento similar entre ellas, con valores negativos (disminución respecto al promedio) en la zona costera y positivos (incremento respecto al promedio) en la zona oceánica. La distribución de CHL y PP fue influenciada posiblemente por surgencias costeras y rotacional del esfuerzo del viento positivo.

El efecto del viento Santa Ana en la TSM, CHL y PP, no fue perceptible en todos los eventos por igual. Su influencia en el océano depende de la magnitud, duración y extensión del viento.

Ante la presencia de eventos Santa Ana sucesivos, a lo largo de la costa se evidenció disminución de la TSM ($\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) con aumento de CHL y PP ($\sim 0.5\text{ mg m}^{-3}$, $\sim 500\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ respectivamente), posiblemente debidas a la acumulación temporal del efecto del viento sobre el océano.

A partir de la presencia de filamentos con alta CHL y PP con dirección suroeste en especial al sur de 28°N , se sugiere la importancia del viento Santa Ana en la productividad de la zona oceánica debido a la advección de agua más productiva desde la zona costera.

Referencias bibliográficas

- Amador, J. A., E. J. Alfaro, O. G. Lizano y V. O. Magaña. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69: 101-142.
- Barton, E., M. Lavín y A. Trasviña. 2009. Coastal circulation and hydrography in the Gulf of Tehuantepec, México, during winter. *Continental Shelf Research*, 29: 485–500
- Behrenfeld, M. y P. Falkowski. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42(1): 1-20.
- Bytnerowicz, A., D. Cayan, P. Riggan, S. Schilling, P. Dawson, M. Tyree, L. Wolden, R. Tissell y H. Preisler. 2010. Analysis of the effects of combustion emissions and Santa Ana winds on ambient ozone during the October 2007 southern California wildfires. *Atmospheric Environment*, 44: 678-687.
- Carr, M.-E. y E. Kearns. 2003. Production regimes in four Eastern Boundary Current systems. *Deep-Sea Research II*, 50: 3199–3221.
- Castro, R. y A. Martínez. 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. Pages 129-147 *En* G. Gaxiola-Castro y R. Durazo, editores. *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. SEMARNAT-INE-CICESE-UABC.
- Castro, R., A. Mascarenhas, Á. Martínez-de-León, R. Durazo y E. Gil-Silva. 2006. Spatial influence and oceanic thermal response to Santa Ana events along the Baja California. *Atmósfera*, 19(3): 195-211.
- Castro, R., A. Parés-Sierra y S. Marinone. 2003. Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la Península de Baja California. *Ciencias Marinas*, 29(3): 275-281.
- Conil, S. y A. Hall. 2006. Local Regimes of Atmospheric Variability: A Case Study of Southern California. *JOURNAL OF CLIMATE*, 19: 4308-4325.
- Chelton, D., M. Freilich y S. Esbensen. 2000. Satellite Observations of the Wind Jets off the Pacific Coast of Central America. Part I: Case Studies and Statistical Characteristics. *Monthly Weather Review*, 128: 1993-2018.
- Durazo, R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Progress in Oceanography*, 83: 361–368.
- Durazo, R., A. Ramírez-Manguilar, L. Miranda y L. Soto-Mardodes. 2010. Climatología de variables hidrográficas. Pages 25-57 *En* G. Gaxiola-Castro y R. Durazo, editores. *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. SEMARNAT-INE-CICESE-UABC.

- Espinosa-Carreón, T., P. Strub, E. Beier, F. Ocampo-Torres y G. Gaxiola-Castro. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research*, 109: C03039.
- Finley, J. y M. Raphael. 2007. The Relationship between El Niño and the Duration and Frequency of the Santa Ana Winds of Southern California. *The Professional Geographer*, 59(2): 184-192.
- Fovell, R. 2002. The Santa Ana winds. <http://www.atmos.ucla.edu/~fovell/ASother/mm5/SantaAna/winds.html>. Revisado: noviembre 2011.
- Gaxiola-Castro, G., J. Cepeda-Morales, S. Nájera-Martínez, T. Espinosa-Carreón, M. D. I. Cruz-Orozco, R. Sosa-Avalos, E. Aguirre-Hernández y J. Cantú-Ontiveros. 2010. Biomasa y Producción del fitoplancton. *En* G. Gaxiola-Castro y R. Durazo, editores. *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. SEMARNAT-INE-CICESE-UABC.
- Hu, H. y W. T. Liu. 2003. Oceanic thermal and biological responses to Santa Ana winds. *Geophysical Research Letters*, 30(11): 1596.
- Hughes, M. y A. Hall. 2010. Local and synoptic mechanisms causing Southern California's Santa Ana winds. *Climate Dynamics*, 34: 847-857.
- Hughes, M., A. Hall y J. Kim. 2011. Human-induced changes in wind, temperature and relative humidity during Santa Ana events. *Climatic Change*, 109 (1): 119-132.
- Lynn, R. y J. Svejksky. 1984. Remotely Sensed Sea Surface Temperature Variability Off California During a "Santa Ana" Clearing. *Journal of Geophysical Research*, 89: 8151-8162.
- Macías, D., P. Franks, M. Ohman y M. Landry. 2012. Modeling the effects of coastal wind- and wind-stress curl-driven upwellings on plankton dynamics in the Southern California current system. *Journal of Marine Systems*, 94: 107-119.
- McCreary, J., H. Lee y D. Enfield. 1989. The response of the coastal ocean to strong offshore winds: With application to circulations in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo. *Journal of Marine Research*, 47: 81-109.
- Mensing, S., J. Michaelsen y R. Byrne. 1999. A 560-Year Record of Santa Ana Fires Reconstructed from Charcoal Deposited in the Santa Barbara Basin, California. *Quaternary Research*, 51: 295-305.
- OMM. 2012. Oceanografía de los Mares Mexicanos. <http://omm.cicese.mx/>. Revisado: enero 2012.
- Ortiz-Figueroa, M. 2009. "Condición Santa Ana"... No todo es viento seco, alergias e incendios forestales. *GEOS*, 29(2): 250-251.
- Raphael, M. 2003. The Santa Ana Winds of California. *Earth Interactions*, 7: 1-13.

- Sommers, W. 1978. LFM Forecast Variables Related to Santa Ana Wind Occurrences. *Monthly Weather Review*, 106: 1307-1316.
- Sosa-Ávalos, R., G. Gaxiola-Castro, R. Durazo y B. Greg. 2005. Efectos de los vientos Santa Ana en las propiedades bio-ópticas frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 31(2): 339-348.
- Sosa-Ávalos, R., G. Gaxiola-Castro, B. Mitchell y J. Cepeda-Morales. 2010. Parámetros fotosintéticos y producción primaria estimada a partir de sensores remotos durante 1999. *En* G. Gaxiola-Castro y R. Durazo, editores. *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. SEMARNAT-INE-CICESE-UABC.
- Svejkovsky, J. 1985. Santa Ana Airflow Observed From Wildfire Smoke Patterns in Satellite Imagery. *Monthly Weather Review*, 113: 902-906.
- Trasviña, A. y E. Barton. 1997. Los 'Nortes' del Golfo de Tehuantepec: la circulación costera inducida por el viento Pages 25-46 *En* F. Lavin, editor. *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Unión Geofísica Mexicana, Monografía 3.
- Trasviña, A., M. Ortiz-Figueroa, H. Herrera, M. Cosío y E. González. 2003. 'Santa Ana' winds and upwelling filaments off Northern Baja California. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 37: 113–129.
- Trenberth, K., W. Large y J. Olson. 1990. The Mean Annual Cycle in Global Ocean Wind Stress. *Journal of Physical Oceanography*, 20: 1742-1760.
- Westerling, A. L., D. R. Cayan, T. J. Brown, B. L. Hall y L. G. Riddle. 2004. Climate, Santa Ana Winds and Autumn Wildfires in Southern California. *Eos*, 85(31): 289-300.