



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



“INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DEL
VIENTO EN EL TRANSPORTE DE POLVO HACIA EL
GOLFO DE CALIFORNIA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA:

ENRIQUE DE JESÚS MORALES ACUÑA

LA PAZ, B. C. S., MÉXICO, DICIEMBRE DE 2015



SIP-14 BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 20 del mes de Noviembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**"INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DEL VIENTO
EN EL TRANSPORTE DE POLVO HACIA EL GOLFO DE CALIFORNIA"**

Presentada por el alumno:

MORALES

ACUÑA

ENRIQUE DE JESÚS

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro:

A	1	4	0	5	5	7
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

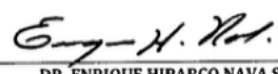
MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

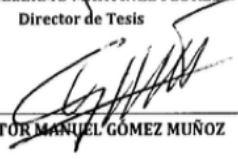
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

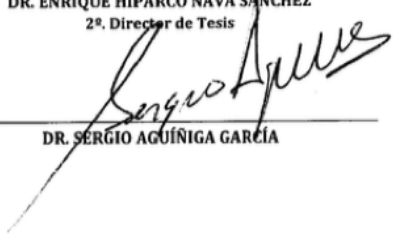
LA COMISION REVISORA

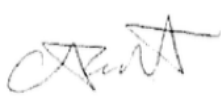
Directores de Tesis


DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES
Director de Tesis

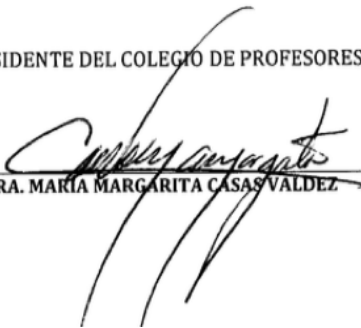

DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SANCHEZ
2º. Director de Tesis


DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ


DR. SERGIO AGUIRRE GARCÍA


DR. CUAUHTÉMOC TURRENT THOMPSON

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ



I.P.N.
CICIMAR
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 30 del mes de Noviembre del año 2015

El (la) que suscribe LIC. ENRIQUE DE JESÚS MORALES ACUÑA Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A140557 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES y DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ

y cede los derechos del trabajo titulado:

"INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DEL VIENTO

EN EL TRANSPORTE DE POLVO HACIA EL GOLFO DE CALIFORNIA

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: emoralesacu@gmail.com - guillermo.martinez.flores@gmail.com - enava@ipn.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

LIC. ENRIQUE DE JESÚS MORALES ACUÑA

Nombre y firma del alumno

Dedicatoria

A mi madre, Edith Marina Acuña Villa

A mi esposa, Elisa Andrea Barras Cáceres

A mis hermanos, Auris y Juan

A mis sobrinos, Gabriela y Mathías

A toda mi familia

Agradecimientos

Tras el fin de todo proceso de formación existen agentes que contribuyen de manera positiva al éxito de tal eventualidad, es por ello que en este momento quiero agradecer primeramente a Dios por darme la oportunidad de seguir haciendo mis sueños realidad y mantenerme con la cabeza en alto. A mis Directores de Tesis, los Doctores Guillermo Martínez Flores y Enrique H. Nava Sánchez, por depositarme su confianza y perfeccionar con cada cuestionamiento el trabajo de investigación que hoy se entrega a la comunidad científica. A mi comité conformado por los Doctores, Sergio Aguíñiga García, Víctor M. Gómez Muñoz, y muy especialmente al Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson por todas las asesorías y apoyo brindado durante la estancia de investigación en el CICESE y al Dr. José Antonio Segovia por creer en nuestro proyecto y patrocinarlo económicamente. Al Dr. Jean Rogelio Linero, por sus voto de confianza y todo el apoyo cognitivo brindado antes y durante el proceso, a los compañeros y docentes del departamento de Oceanología por sus aportes y críticas en cada uno de los seminarios, a las directivas del CICIMAR, de manera especial al CP. Humberto Ceseña por su gran gestión y colaboración en los tramites escolares, al Dr. Enric Pallas por su colaboración en la validación de los datos del NARR, a mis tíos Carlos, Maritza, Victoria y Manuel por brindarme su consejo cada vez que sentía que las energías me fallaban, a todos los amigos que se fueron, los que permanecieron y los que llegaron. Al CICIMAR-IPN por abrir sus puertas, permitirme el acceso y la cristalización de mis sueños. Al CICESE por aprobar la estancia en sus instalaciones. A los proyectos, “Flujo atmosférico de metales bioactivos y su solubilidad en el Golfo de California: Un escenario hacia el cambio climático” (CONACYT- N° 166897) y “Modelación numérica de las corrientes en la plataforma pacifica continental del sur de la península de Baja California” (SIP-IPN N° 20150504) por su apoyo económico, tecnológico y los datos de colectores de partículas. A las agencias Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), por facilitarnos sus datos.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Planteamiento del problema	11
1.2. Hipótesis.....	12
1.3. Objetivo General	12
1.4. Objetivos Específicos	13
2. ESTADO DEL CAMPO DEL ARTE	13
2.1. Polvo	13
2.2. El viento.....	15
2.3. Movilización de las partículas del suelo	19
2.4. Modelos de transporte de polvo.....	21
2.4.1. Modelo HYSPLIT	22
2.5. Zonas erosivas en el noroeste de México.....	22
2.6. Imágenes MODIS.....	25
2.7. Área de Estudio.....	27
3. DATOS Y MÉTODOS.....	28
3.1 Datos	28
3.1.1. Datos cartografía digital	28
3.1.2. Datos de viento	29
3.1.3. Imágenes de satélite.....	29
3.2. Métodos.....	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. Zonas con mayor probabilidad de actuar como fuente de polvo	32
4.2. Campos vectoriales de viento	34
4.3. Variabilidad de los campos de viento.....	37

4.3.1. Variación mensual de la velocidad del viento	37
4.3.2. Organización de los datos de viento por zonas de estudio	38
4.3.3. Variación mensual de la velocidad del viento en las zonas fuente.....	39
4.3.4. Condición del viento que propicia el transporte polvo hacia el GC.....	42
4.3.5. Variación diaria de la velocidad del viento en las zonas fuente.....	44
4.4. Detección polvo transportados vía eólica	50
4.5. Simulación del transporte de polvo con el modelo HYSPLIT	54
4.6. Flujo promedio de polvo hacia el Golfo de California.....	56
4.6.1. Análisis del flujo promedio de polvo en los colectores de partículas	56
4.6.2. Variabilidad espacio-temporal del viento y su efecto en el flujo promedio de polvo para el 2011	59
4.6.3. Análisis de la dirección del viento y el flujo promedio de polvo	62
4.7. Modelo conceptual	64
4.7.1. Erosión eólica en los desiertos arenosos (ξ)	64
4.7.2. Circulación de los vientos desde la superficie terrestre hasta una altura de 1000 hPa (C).....	65
4.7.3. Trayectoria de eventos de polvo (τ)	66
4.7.4. Sedimentación de polvo en el Golfo de California (S)	67
5. CONCLUSIONES	67
6. RECOMENDACIONES	68
7. REFERENCIAS	70
ANEXOS.....	80
Anexo 1. Validación de los Datos de Viento del NARR	81
1.1. Significación práctica del modelo NARR	81
1.2. Análisis Espectral (Método de Welch)	85
1.3. Validación de datos NARR	86

Anexo 2. Variación mensual de la velocidad del viento en las zonas fuente	95
Anexo 3. Diagrama de caja y bigote	106

Listado de figuras

Figura 1. Distribución global de regiones fuente de polvo. Tomada de Próspero et al., (2002).	11
Figura 2. Fuente de partículas en el aire. Tomada y modificada de Pye (1987)....	14
Figura 3. Circulación del viento alrededor de los máximos (H), mínimos de presión (L) y la rotación de la tierra. Tomada y modificada de Wallace & Hobbs, (2006). .	16
Figura 4. Células de Hadley, vientos alisios, centro de alta (H) y baja (L) presión. Tomada y modificada de Wallace & Hobbs (2006).	17
Figura 5. Monzón mexicano. (a) circulación atmosférica para la media del viento a 450 de altura. (b) circulación atmosférica para la media del viento a 700 mbar Tomada y modificada de Reyes et al. (1994).....	19
Figura 6. Representación esquemática de las fuerzas que actúan sobre una partícula de suelo que determinan su movilización por el viento según Bagnold (1941).	20
Figura 7. Diagrama de fuerza que actúan sobre una partícula de suelo que determina su movilización por el viento.....	20
Figura 8. Tipos de transporte eólico. Tomado de, Golberg & Kin (2003).	21
Figura 9. Métodos del cálculo de advección y dispersión (González, 2009).....	22
Figura 10. Desiertos de Norteamérica (Shreve, 1942).	23
Figura 11. Clasificación de desiertos en el Noroeste de México.....	24
Figura 12. Zona de Desiertos Arenosos del Noroeste de México, tomada y modificada (Martínez-Flores & Segovia-Zavala, 2013).	25
Figura 13. Cobertura y especificaciones generales del MODIS, tomada y modificada (Jean-François, 2011).	26
Figura 14. Área de estudio. Principales unidades de suelo en México (derecha) (tomada de SERMANAT, 2006); Mapa elaborado con datos de: Áreas susceptibles a erosión eólica, división política, localidades con densidad de población mayor a 10000 habitantes en el noroeste de México (CONABIO, 2010).	27
Figura 15. Diagrama conceptual del diseño metodológico general. Se representan los procesos (rectángulos), datos (cilindros) y su relación con cada uno de los	

objetivos particulares enumerados desde el 1 hasta el 7 como se puede ver en cada uno de los módulos demarcados con el recuadro punteado de color azul....	30
Figura 16. Distribución de los colectores de polvo tomada y modificada de Segovia-Zavala et al. (2011).	32
Figura 17. Zonas continentales del NW de México que actúan como fuente de polvo (mapa elaborado con cartografía digital (Tipo de suelo, vegetación, zonas áridas y estados de la República Mexicana) de la CONABIO (2010), INEGI (2010) y SIAP (2012).	33
Figura 18. Mapas de campos vectoriales de viento en el Noroeste de México.	36
Figura 19. Promedio mensual de la magnitud de la velocidad del viento (m/s) 1979-2013 a 1000 hPa.	38
Figura 20. Mascara para la extracción de datos de viento por zona de estudio. (a) Desiertos arenosos del noroeste de México; (b) Mascara con pixeles que ocupan cada región de desierto arenoso.	39
Figura 21. Promedio mensual de la magnitud del viento en cada una de las zonas desérticas. Secuencia de meses de noviembre de 1979-2013 (línea azul), la línea roja representa el valor umbral de la velocidad del viento (5.5 m s^{-1}).	40
Figura 22. Dirección del viento que propicia el transporte de polvo hacia el GC desde cada una de las zonas de estudio.	42
Figura 23. Porcentaje de viento que propicia el transporte de polvo al GC, zona ZD6, noviembre de 2011. Con rojo se muestran los datos que cumplen con la condición de dirección ($180^\circ \leq \theta \leq 300^\circ$) e intensidad del viento ($\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$).	43
Figura 24. Porcentaje de viento que propicia el transporte de polvo al GC, y cumplen con la condición de dirección e intensidad del viento desde cada una de las zonas fuente.	44
Figura 25. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la región ZD1, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.	45
Figura 26. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la región ZD2, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja	

representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.	46
Figura 27. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la región ZD3, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.	47
Figura 28. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la región ZD4, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registro.	48
Figura 29. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la región ZD5, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.	49
Figura 30. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la región ZD6, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.	50
Figura 31. Imagen MODIS/AQUA, aparente presencia de polvo desde las zonas fuente hacia el GC.	51
Figura 32. Detección de polvo en imágenes MODIS (22/10/2007).	51
Figura 33. Detección de polvo en imágenes MODIS (27/11/2011).	52
Figura 34. Superposición de campos de viento con la imagen MODIS del 22/10/2007 procesada para la detección de polvo.	53
Figura 35. Superposición de campos de viento con la imagen MODIS del 27/11/2011 procesada para la detección de polvo.	54
Figura 36. Trayectorias de eventos de polvo (líneas de colores) con el modelo HYSPLIT. 22/10/2007.	55
Figura 37. Trayectoria de eventos de polvo mediante la aplicación del modelo lagrangiano para la trayectoria de partículas HYSPLIT. 27/11/ 2011.	56

Figura 38. Flujo de polvo registrado en los colectores para el año 2011 en la región norte y central del GC. Bahía de los Ángeles (línea azul), San Felipe (línea verde) y Puerto Peñasco (línea roja)	59
Figura 39. Rosas de viento, generadas con datos NARR cuya resolución espacial es de 32 km y temporal 8 registros diarios. La convención hacia donde sopla el viento en la región de Bahía de los Ángeles para el 2011.	60
Figura 40. Rosas de viento, generadas con datos NARR cuya resolución espacial es de 32 km y temporal 8 registros diarios. La convención hacia donde sopla el viento en la región de San Felipe para el 2011.	61
Figura 41. Rosas de viento, generadas con datos NARR cuya resolución espacial es de 32 km y temporal 8 registros diarios. La convención hacia donde sopla el viento en la región de Puerto Peñasco para el 2011.....	62
Figura 42. Vector resultante de la dirección del viento (líneas) y el flujo parcial de polvo (barras) para el periodo correspondiente a 2011.....	63
Figura 43. Modelo conceptual para el transporte polvo hacia el GC (elaborado a partir de google Earth).....	64
Figura 44. Ubicación de las estaciones meteorológicas y datos extraídos de los puntos de la malla del NARR	82
Figura 45. Representación de la velocidad del viento en la estación meteorológica y con los datos del modelo NARR para la región de Hermosillo.....	92
Figura 46. Densidad espectral de potencia por el método de Welch para la región de San Luis Rio Colorado, periodo 2011, Base de datos NARR y Estaciones Meteorológicas	93
Figura 47. Densidad espectral de potencia por el método de Welch para la región de la Rumorosa, periodo 2011, Base de datos NARR y Estaciones Meteorológicas	93
Figura 48. Densidad espectral de potencia por el método de Welch para la región de Hermosillo, periodo 2011. Base de datos NARR y Estaciones Meteorológicas	94

Listado de tablas

Tabla 1. Escala de Beaufort para la intensidad del viento. Tomada y modificada de SEMAR (2015).	15
Tabla 2. Datos de las bandas del sensor MODIS y su longitud de onda utilizadas para el algoritmo de Miller (2003). Tomado y modificado de Álvarez (2014).	26
Tabla 3. Frecuencia mensual en que el promedio de la magnitud de la velocidad del viento es $\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$ en cada una de las zonas desérticas identificadas para el periodo de 1979-2013.	41
Tabla 4. Porcentaje mensual de intensidad de viento que propicia la erosión eólica.	41
Tabla 5. Zona desértica con mayor porcentaje de viento que propicia la erosión eólica.	42
Tabla 6. Porcentaje de viento que cumple con la condición de intensidad ($\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$) y dirección (hacia el GC) para propiciar el transporte de polvo al GC para el periodo 1979-2013 en cada una de las zonas fuente.	43
Tabla 7. Flujo de polvo obtenido por el colector en la región de Bahía de los Ángeles durante el 2011.....	57
Tabla 8. Flujo de polvo obtenido por el colector en la región de San Felipe durante el 2011.....	57
Tabla 9. Flujo de polvo obtenido por el colector en la región de Puerto Peñasco durante el 2011.....	58
Tabla 10. Direcciones que permiten el transporte de polvo hacia el GC desde cada una de las zonas que actúan como fuente de polvo en el noroeste de México.	62
Tabla 11. Significación práctica del modelo NARR. Región, San Luis Rio Colorado, periodo 2011.....	87
Tabla 12. Significación práctica del modelo NARR. Región, La Rumorosa, periodo 2011.....	89
Tabla 13. Significación práctica del modelo NARR. Región, Pichilingue, periodo enero a junio del 2011	90
Tabla 14. Significación práctica del modelo NARR. Región, Hermosillo (B. Kino), periodo 2011.....	91

Resumen

El polvo del suelo es puesto en movimiento debido a la interacción entre el viento y la superficie terrestre, logrando suspenderse en el aire y ser transportado por el mismo viento. Las intrusiones de polvo causan enfriamiento en la superficie de los océanos e influyen en la productividad primaria y en el clima. Por sus características climáticas el noroeste de México se considera una región ideal para estudiar el transporte atmosférico de polvo. El objetivo de este trabajo es estimar la influencia de la variabilidad espacio-temporal del viento y las condiciones del terreno en el transporte de polvo al Golfo de California (GC). Para esto se elaboró (utilizando un sistema de información geográfica y cartografía temática) un mapa en el que se identificaron seis zonas correspondientes a desiertos arenosos que por su ubicación tienen el potencial de actuar como fuente de polvo al GC. A partir de los datos de viento del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR) de 1979 a 2013, se generaron vectores de viento (m s^{-1}) caracterizando su variabilidad en el noroeste de México y en cada una de las zonas desérticas. Se incorporaron imágenes MODIS a las que se le aplicó un algoritmo para la detección de polvo y sobre las imágenes procesadas se representaron los campos vectoriales de viento sobre las imágenes procesadas, se simularon escenarios de transporte de aerosoles con el modelo lagrangiano para la trayectoria de partículas (HYSPLIT). Se obtuvo el flujo de polvo para la región norte y para las islas del GC, mediante la ubicación de seis colectores de partículas en tres estaciones. Se elaboró a partir de las condiciones del terreno y la variabilidad del viento un modelo conceptual para el transporte de polvo hacia el GC. Resultados indican que las estaciones de primavera e invierno representan un mayor porcentaje ($\approx 56.17\%$) de las condiciones propicias del viento (dirección e intensidad del viento) para el transporte de polvo hacia el GC. Los eventos de tormentas de polvo se presentan en los meses de octubre a marzo. Las horas del día en las que las condiciones de viento (velocidad y dirección) permiten la erosión eólica corresponden al intervalo entre 3:00 a 15:00 horas con existencia de eventos con valores atípicos de $10\text{-}20 \text{ m s}^{-1}$. La zona desértica 4 representa $\approx 48.8 \%$ de viento con dirección que propicia el transporte de polvo hacia el GC. El flujo total de polvo

de las tres zonas (Puerto Peñasco, San Felipe y Bahía de los Ángeles) hacia el GC durante el año 2011 fue de $\approx 7.4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, el cual fue colectado a través de tres estaciones de muestreo. Se encontró también que las rutas que siguen los eventos de polvo se pueden verificar mediante la utilización del modelo lagrangiano para la trayectoria de partículas.

Abstract

Soil dust is set in motion due to the interaction between the wind and the Earth's surface becoming suspended in the air and be transported by the wind itself. Intrusions of dust cause cooling at the surface of the oceans and affect primary productivity and climate. Due to its climatic conditions the northwestern Mexico is considerate an ideal region to study atmospheric transport of dust. The objective of this work is to estimate the influence of the space-time variability of wind and terrain conditions in the transport of dust into the Gulf of California (GC). Thus, a map was created (using a geographic information system and thematic maps) a map in which six identified zones corresponding to sandy deserts were identified to have the potential to act as a source of dust to the GC. From wind data Regional Reanalysis of North America (NARR) for 1979 to 2013, wind vectors (m s^{-1}) were generated to characterize the wind variability in northwestern Mexico and in each of desert zones. MODIS images were processed whit an algorithm to detect aerosols and wind vector fields, on the processed images wind vector field were represented and aerosol transport scenarios were simulated with the Lagrangian model for particle trajectory (HYSPLIT). Dust flow for the northern GC and its islands, was obtained of the GC, by placing six particle traps during in three seasons. A conceptual model for dust transport into the GC was elaborate considering terrain conditions and wind variability. Results indicate that the seasons of spring and winter represent a higher percentage ($\approx 56.17\%$) of the favorable wind conditions (wind speed and direction) for the transporting dust into the GC. Dust storm events occur during the months of October to March. The times of day when the wind conditions (speed and direction) allow wind erosion is during the interval between 3:00 to 15:00 hours with existence of outlier events of $10\text{-}20 \text{ m s}^{-1}$. Desert zone 4 represents $\approx 48.8\%$ of wind and direction that facilitates the transport of dust into the GC. The total dust flow from the three areas to the GC in 2011 was $\approx 7.4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, which was determined from the three dust colleting stations (Rocky Port, San Felipe and Bay of the Angels). It was also found that tracks followed by dust events of dust can be verified using the Lagrangian model for particle trajectories.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de polvo del desierto, su transporte, y depósito es un área de creciente importancia en las investigaciones sobre el ambiente a nivel global, ya que las descargas de polvo producen cambios significativos en el clima afectando la temperatura del aire a través de la absorción y dispersión de la radiación solar, tiene efectos sobre la productividad primaria marina y hay evidencia de que causa enfriamiento en el océano (Goudie & Middleton, 2006; Martínez-Avellaneda, 2010).

A nivel global se han realizado estudios en los que se han identificado tres aspectos importantes: (1) las principales regiones de origen de polvo (Fig. 1), (2) la entrada atmosférica de material terrígeno en las principales cuencas oceánicas y (3) la influencia de estas intrusiones sobre la biogeoquímica de los océanos, mediante técnicas de teledetección y simulaciones en modelos numéricos y atmosféricos (Prospero et al., 2002; Miller, 2003; Michalakes et al., 2004; Jickells et al., 2005; Mahowald et al., 2005; Tetra Tech, 2008; Baddock et al., 2009).

Tanaka & Chiba, (2006) identificaron nueve regiones: (1) el norte de África, (2) Península Arábiga, (3) Asia Central, (4) el oeste de China, (5) el este de China, (6) América del Norte, (7) América del Sur, (8) África del Sur y (9) Australia, que a nivel global actúan como fuente de polvo y obtienen para América del Norte un flujo medio anual de polvo equivalente a 2 Tg yr^{-1} que representa el 0.1% del flujo de polvo a nivel global y compara sus resultados con los obtenidos por Zender et al. (2003), Ginoux et al. (2004) y Miller et al. (2004), quienes encuentran valores promedio anuales de polvo para Norte América entre 8 a 53 Tg yr^{-1} .

En el desierto de Chihuahua Rivera et al. (2009), realizaron un estudio de la incidencia de las tormentas de polvo existentes en el desierto y que entre los años 2001-2005 afectaron El Paso del Norte (El Paso, EE.UU. / Ciudad Juárez, México) mediante el análisis estadístico lagrangiano de HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) y evaluaron la permanencia de la trayectoria del flujo y las velocidades del viento asociadas a eventos extremos de polvo.

Delgadillo-Hinojosa (2000), estimó el aporte atmosférico del total de partículas que van hacia el Golfo de California (GC) con datos de colectores de partículas ubicados en la región de Sonora y afirma que al menos el 43% de los aportes atmosféricos de partículas totales al GC obtenidos corresponden al flujo de polvo. Thunell (1998), obtiene el valor promedio para el flujo total de partículas ($139.3 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) durante el periodo comprendido entre 1991-1996, de los cuales el 31.87% corresponde a material litogénico transportado por vía eólica con mayores valores durante el verano.

Segovia-Zavala et al. (2009), estudiaron el aporte atmosférico y concentración de hierro disuelto en la capa superficial de la región central del GC llegando a la conclusión de que la distribución de Fe disuelto en la capa superficial del GC es gobernada por un complicado balance en el aporte atmosférico superficial del que sus resultados reflejaron un flujo atmosférico de partículas con valores que van de 12 a $143 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ con valores máximos ($> 65 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) durante la temporada de verano y otoño y mínimos ($< 40 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) durante la primavera para la parte central del GC. La ubicación y distribución de las zonas áridas alrededor del GC y el marcado ciclo estacional en la dirección del viento permiten definir al GC como un sitio ideal para estudiar la influencia de aportes atmosféricos sobre los procesos biogeoquímicos que ocurren en sus aguas (Lavín et al., 1997; Segovia-Zavala et al., 2009). El aumento en la temperatura (de 3 a 4 °C, en el noroeste, reduciéndose ligeramente hacia el sur-sureste, donde el incremento sería de poco más de 2 grados centígrado) pronosticado para los próximos 100 años, implica un incremento potencial en los procesos de desertificación y sequías para el noroeste de México (Reyes-Coca 1990; Estrada-Porrúa, 2001). Martínez et al. (2013), realizaron una evaluación de la variabilidad espacio-temporal de la intensidad y dirección del viento en el NW de México en las capas bajas de la atmósfera y proponen la existencia de una relación entre los patrones de circulación atmosféricos y el transporte de material terrígeno hacia el GC, dejando de esta manera un camino abierto hacia el estudio de la influencia de la variabilidad espacio-temporal del viento en el transporte de polvo hacia el GC.

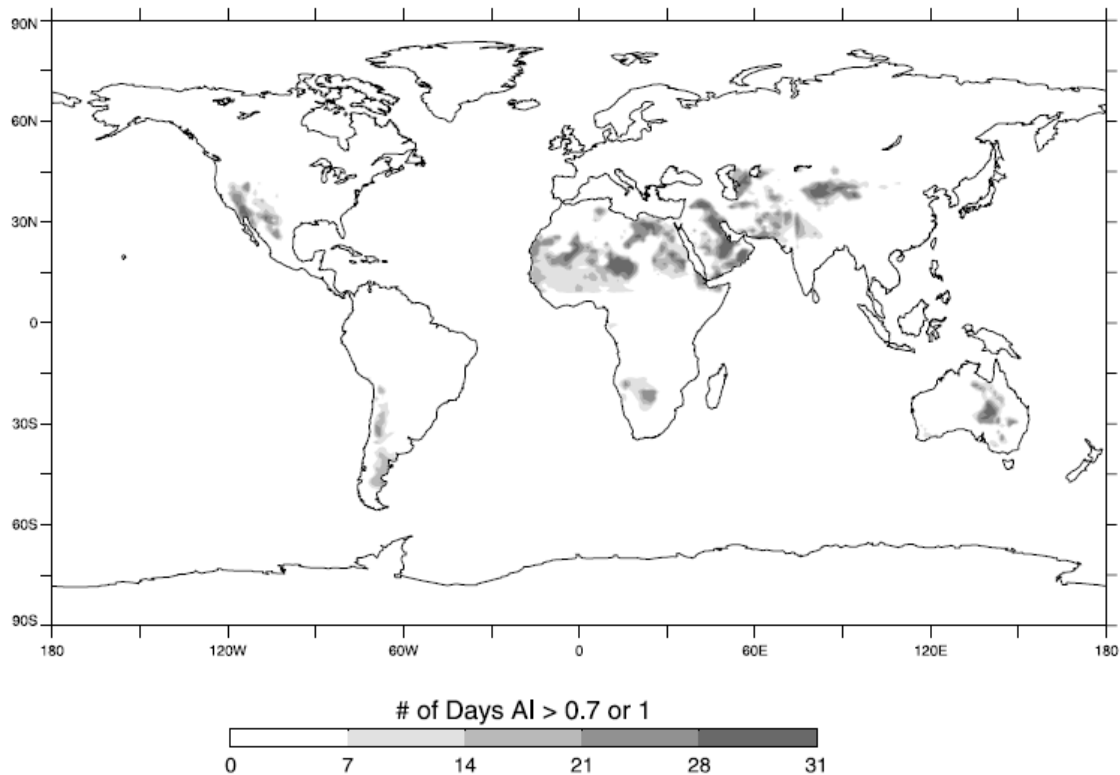


Figura 1. Distribución global de regiones fuente de polvo. Tomada de Próspero et al., (2002).

1.1. Planteamiento del problema

El polvo originado en las zonas áridas y semiáridas por los efectos propios de la erosión eólica, es transportado bajo la acción del viento y pueden alcanzar distancias equivalentes a miles de kilómetros hasta encontrar las condiciones atmosféricas (precipitaciones o baja velocidad del viento) que provocan su depósito en la superficie de los océanos. La entrada externa dominante de hierro a la superficie del océano abierto es eólica por transporte de polvo, sobre todo de los grandes desiertos del mundo (Jickells et al., 2005). El transporte de polvo lleva consigo el hierro particulado, uno de los elementos más importantes en los procesos de fertilización del océano debido a que desempeña un papel importante en muchos procesos bioquímicos, como la fotosíntesis, y es un elemento esencial para la vida en los océanos y la absorción de oxígeno de la atmósfera (Tetra Tech, 2008). Por lo anterior es importante la caracterización de las zonas desérticas que rodean el GC, así como la influencia de la variación del viento en los procesos de erosión y transporte de polvo.

Se pronostica que en la región noroeste de México, las temperaturas podrían incrementarse de 3 a 4 °C en los próximos 100 años (Estrada-Porrúa, 2001), a este pronóstico se une el informe realizado por el IPCC (2013) en el que se esperan aumentos en la temperatura entre 3.7 y 4.3 °C produciendo un incremento potencial en los procesos de desertificación y sequías (Reyes-Coca, 2004; Chávez et al., 2014). Los incrementos pronosticados en la temperatura ubican el 29.61% de la superficie continental de México en situaciones sensibles a variaciones climáticas entre las que se puede mencionar la expansión de las zonas desérticas en el noroeste de México (Chávez et al., 2014).

El GC por encontrarse rodeado de zonas áridas y desiertos arenosos que actúan como fuente de polvo, es un sitio ideal para estudiar la influencia de aportes atmosféricos (Segovia-Zavala et al., 2009) que obedecen al marcado ciclo estacional del viento en el que estos soplan del noroeste durante el invierno y del sureste durante el verano (Lavín et al., 1997).

Si se caracterizan las zonas áridas y desérticas en función de su participación como fuente de polvo y se estudia la variabilidad del viento a diferentes escalas espaciales y temporales teniendo en cuenta direcciones longitudinales y transversales al GC, se pueden obtener resultados óptimos sobre los aportes eólicos de polvo hacia el GC.

1.2. Hipótesis

La caracterización de la variabilidad del viento y de las condiciones del terreno del Noroeste de México nos permite identificar patrones espaciales y temporales de las rutas de transporte de polvo, así como un gradiente noroeste-sureste en el depósito de este material en el GC.

1.3. Objetivo General

Estimar el transporte eólico de polvo al GC, mediante la determinación de la influencia de la variabilidad espacio-temporal del viento y las condiciones del terreno del Noroeste de México.

1.4. Objetivos Específicos

- Determinar las zonas continentales del noroeste de México que actúan como fuente potencial de aporte de polvo hacia el GC.
- Generar la secuencia de campos de viento del noroeste de México a partir de ocho registros diarios de las componentes horizontales u y v del viento sobre la superficie de 1000 hPa del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR) para los años desde 1979 a 2013.
- Analizar los patrones de variabilidad espacio-temporal de los campos de viento.
- Incorporar imágenes MODIS/Aqua (1999-2012) procesadas con un algoritmo para detectar polvo transportados por vía eólica.
- Simular escenarios de transporte de polvo hacia el GC, considerando las condiciones de viento y del terreno.
- Cuantificar el flujo horizontal de polvo que es transportado por vía eólica hacia el GC.
- Formular un modelo conceptual con tendencias espaciales y temporales que determinen las rutas de transporte eólico de polvo al GC.

2. ESTADO DEL CAMPO DEL ARTE

Exponer sintéticamente los avances existentes acerca de las temáticas que se enmarcan dentro de la presente investigación nos brinda una herramienta conceptual para comprender de manera particular los resultados que se obtienen.

2.1. Polvo

Se hace necesario hacer referencia sobre la gran familia a la que pertenece nuestro objeto de estudio (el polvo). Los aerosoles son una suspensión coloidal de partículas sólidas y líquidas en un gas que son transportadas por éste en su movimiento. El término aerosol se utiliza estrictamente para hacer referencia a la fase gaseosa o para referirse a partículas (Prospero et al., 1983; Pye, 1987). Según su origen estos pueden ser antropogénicos o naturales siempre que estos sean por la actividad humana directa o la propia interacción natural entre la atmósfera y la superficie terrestre (Estellés, 2006).

Pye (1987) describe mediante un gráfico (Fig. 2) la existencia de seis fuentes de partículas que se encuentran en el aire (sales marinas, polvo del suelo, polvo volcánico, emisiones industriales, restos de incendios y el polvo cósmico), afirma también que la deflación de los sedimentos y los suelos en la superficie de la tierra son la principal fuente de partículas de polvo atmosféricas.

Los aerosoles según su mecanismo de producción se clasifican en *primarios* o *secundarios*, si su origen es natural lo clasificaremos dentro de los aerosoles primarios y se generan directamente en los mares y océanos, las zonas áridas, en las regiones forestales por la actividad biológica, en expulsiones de carácter volcánico. Los secundarios se forman en las propias capas atmosféricas, mediante mecanismos de producción que transforman los aerosoles incorporados directamente.

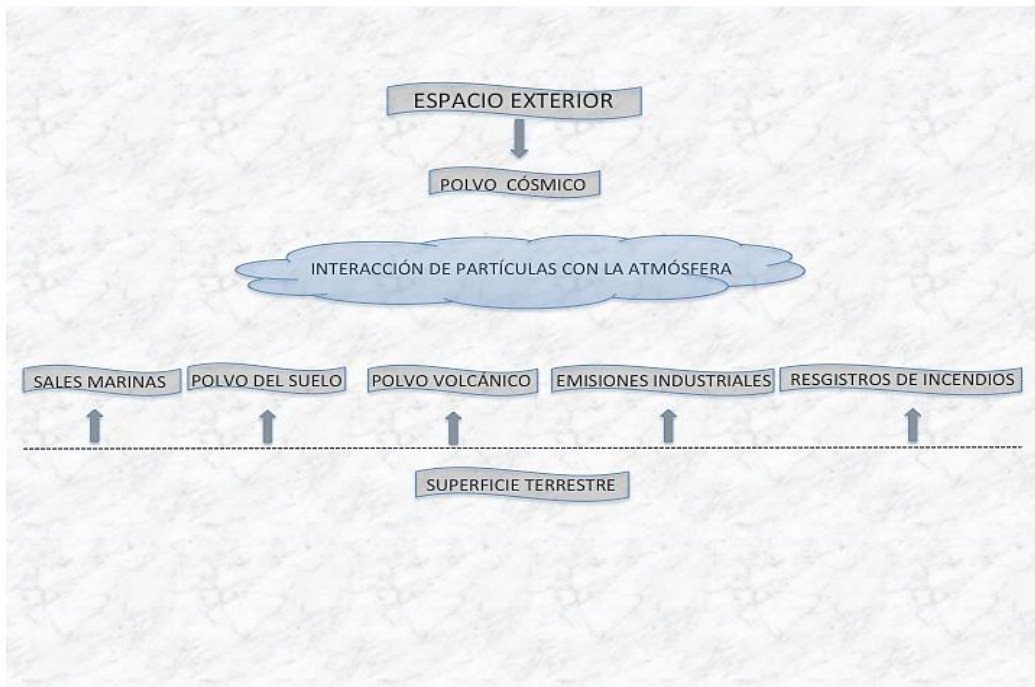


Figura 2. Fuente de partículas en el aire. Tomada y modificada de Pye (1987).

Los aerosoles en tamaño van desde los 0.001 a 100 μm , por sus componentes se clasifican en: sales marinas, minerales, sustancias carbonáceas, sulfatos, nitratos, compuestos orgánicos, volcánicas y fuentes extraterrestres, otra de las formas de clasificación de los aerosoles es con respecto a su climatología: Aerosoles marítimos, continentales, desérticos, árticos y antárticos (Estellés,

2006). En este trabajo se considera el polvo como las partículas sólidas pertenecientes a la familia de los aerosoles primarios terrígenos propios de las zonas áridas, cuyos tamaños oscilan entre 0.1 y 10 μm . Estas partículas son puestas en movimiento debido a la interacción entre el viento y la corteza terrestre logrando suspenderse en el aire y ser transportadas debido al movimiento del mismo.

2.2. El viento

El aire es un fluido y por tanto tiene capacidad de movimiento lo que conlleva transporte de calor y humedad. El resultado final de la circulación es una tendencia a la reducción de las diferencias de temperatura forzadas por el desigual calentamiento diabático entre las zonas tropicales y polares o por propiedades diferentes de la superficie (mar, tierra, albedo, topografía, humedad, vegetación) (Mesa-Sánchez et al., 1997). La intensidad del viento se clasifica según su rapidez (Beaufort, 1806). La SEMAR (2015), haciendo referencia a la escala propuesta por Beaufort (1806), presentó una clasificación considerando los daños o efectos causados por el viento sobre el mar y sobre la tierra (Tabla. 1).

Tabla 1. Escala de Beaufort para la intensidad del viento. Tomada y modificada de SEMAR (2015).

Escala	Velocidad (kn)	Velocidad (Km h ⁻¹)	Efectos del viento en la tierra
0	<1	1	Hay calma, el humo asciende verticalmente
1	1.0 - 3.0	1.0 - 5.0	El humo indica la dirección del viento
2	4.0 - 6.0	6.0 - 11.0	Se mueven las hojas de los arboles
3	7.0 - 10.0	12.0 - 19.0	Las copas de los árboles se agitan y las banderas ondulan
4	11.0 - 16.0	20.0 - 28.0	Además de que las copas de los árboles se agitan, el polvo y los papeles se levantan
5	17.0 - 21.0	29.0 - 38.0	Se observan pequeños movimientos en los árboles y la superficie de los lagos se ondula
6	22.0 - 27.0	39.0 - 49.0	Las ramas de los árboles se mueven y resulta mantener abierto el paraguas
7	28.0 - 33.0	50.0 - 61.0	Los arboles grandes se mueven y es difícil caminar contra el viento

8	34.0 - 40.0	62.0 - 74.0	Las copas de los árboles se quiebran, además de que la circulación de las personas se dificulta
9	41.0 - 47.0	75.0 - 88.0	Se observan daños en los árboles y es imposible caminar contra el viento
10	48.0 - 55.0	89.0 - 102.0	Los árboles son arrancados y las estructuras de las construcciones sufren daños
11	56.0 - 63.0	103.0 - 117.0	Ocurren daños severos en las construcciones, tejados y arboles
12	>64	>118	Hay destrucción total

El calentamiento diferencial entre las latitudes bajas y altas da lugar a movimientos atmosféricos en una amplia gama de escalas, los centros de máxima presión (H) y mínima presión (L) ubicados alrededor de la banda ecuatorial contribuyen a la circulación del viento alrededor de las isobaras obteniendo de esta manera circulaciones ciclónicas y anticiclónicas como se muestra en la Figura 3. (Wallace & Hobbs, 2006).

La circulación extratropical está dominada por los cinturones de viento del oeste, en torno a 45°N y 45°S. Los vientos del oeste son el resultado de una perturbación constante con migración hacia el este, estos se relacionan con los anticiclones subtropicales del Pacífico y Atlántico.

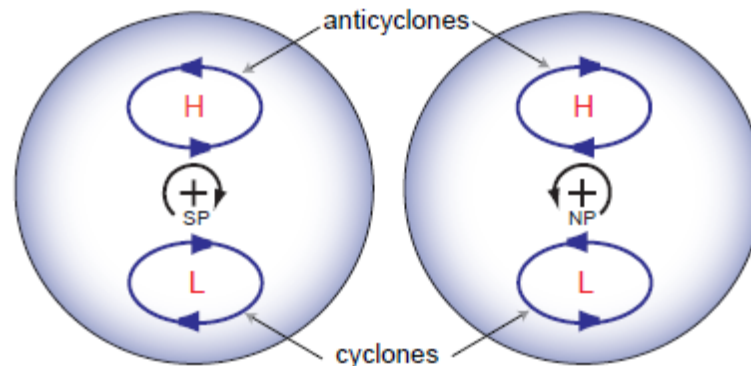


Figura 3. Circulación del viento alrededor de los máximos (H), mínimos de presión (L) y la rotación de la tierra. Tomada y modificada de Wallace & Hobbs, (2006).

La circulación tropical está dominada por los vientos alisios que son mucho más estables, marcados por un componente de viento zonal oriental y un componente dirigido hacia el ecuador. Los vientos alisios del noreste en el hemisferio norte y los vientos alisios del sureste en el hemisferio sur son la

manifestación superficial de vuelco de circulaciones que se extienden a través de la profundidad de la troposfera. Las celdas de Hadley se caracterizan por enviar el flujo hacia el ecuador en la capa límite, aumentar el movimiento dentro de un par de grados del ecuador, retornar el flujo hacia los polos en la troposfera superior tropical, y que se hunda este movimiento en el subtrópicos (Figura 4. Wallace & Hobbs, 2006). En los trópicos la circulación de depresiones térmicas por encima del terreno y mesetas elevadas puede impulsar la circulación de monzones. En las áreas costeras, el ciclo brisa marina/ brisa terrestre puede definir los vientos locales, mientras en las zonas con relieve variado, las brisas de valle y montaña pueden dominar los vientos locales (Araya et al., 2010; Orozco-Contreras, 2014). Los movimientos verticales de las masas de aire de baja densidad provocan vacíos y desequilibrios de presión, como mecanismo de restauración del equilibrio, masas de aire de mayor densidad, contiguas a las regiones de inestabilidad, se desplazan para ocupar estos vacíos de baja presión, dando origen a las celdas de circulación (Moragues & Rapallini, 2003).

De acuerdo con las escalas espaciales y temporales de los sistemas, se distinguen tres tipos de viento: los vientos sinópticos de gran escala, los regionales y los locales (Cañellas-Jalón, 2011).

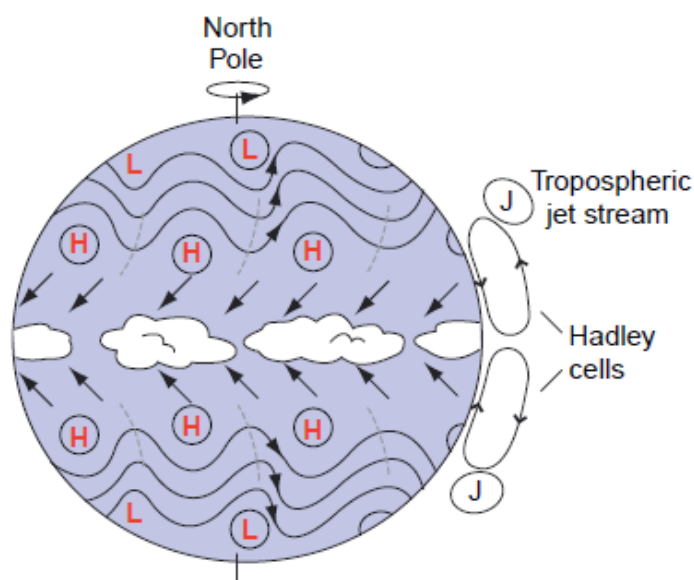


Figura 4. Células de Hadley, vientos alisios, centro de alta (H) y baja (L) presión. Tomada y modificada de Wallace & Hobbs (2006).

Las escalas temporales en las que se puede producir el viento van desde los flujos tormentosos que duran decenas de minutos hasta brisas locales con duración de varias horas. Según su intensidad se distingue la existencia de ráfagas, que son aumentos repentinos de la intensidad del viento durante un tiempo corto, las turbonadas, que son vientos intensos de duración intermedia (aproximadamente un minuto) y vientos de larga duración con diversos nombres según su fuerza media, entre ellos se encuentran los vientos de brisa, temporal, tormenta y huracán (Roth, 2003).

Los patrones de viento en el noroeste de la República Mexicana han sido descritos de la siguiente forma: Existen dos estaciones principales, un invierno de media latitud, en que los vientos se orientan hacia el sur, y un verano subtropical cuando los vientos soplan hacia el norte (Reyes & Lavín, 1997). En el primer caso un anticiclón se posiciona sobre el suroeste justo en la Gran Cuenca (Estados Unidos) ocasionando que el flujo del aire se dirija hacia el sur. En la segunda estación la circulación sinóptica es dominada por una presión baja localizada sobre el desierto de Sonora, y esto favorece la advección de masas de aire tropical hacia la parte superior del GC (el Monzón de América del Norte). Los vientos orientados hacia el sur son más fuertes y menos húmedos que los vientos con dirección norte. La circulación atmosférica se da principalmente a través del eje del GC a causa de la topografía elevada en ambos lados (Badan Dagon et al., 1991). Reyes et al. (1994), estudian los meses de verano (julio, agosto y septiembre) de 1990, e identifican en la región del NW de México a 450m de altura la circulación monzónica, con flujos atmosféricos del Este provenientes del Golfo de México, y vientos del suroeste, provenientes del Pacífico tropical oriental, convergiendo sobre la Sierra Madre Oriental y el Desierto Sonorense (Península de Baja California, Sonora, Arizona); indicando que en los niveles superficiales, el Pacífico tropical es una importante fuente de humedad para la precipitación de verano en el oeste mexicano. En niveles intermedios (700 mbar) la circulación del Este y Suroeste domina la región occidental de México. Los niveles superiores (<500 mbar) muestran solo componente del Este, indicando que en estos niveles el viento del Golfo de México y el Atlántico es el principal medio de transporte de

humedad hacia el noroeste, aunque con humedades relativamente bajas como se muestra en la Figura 5.

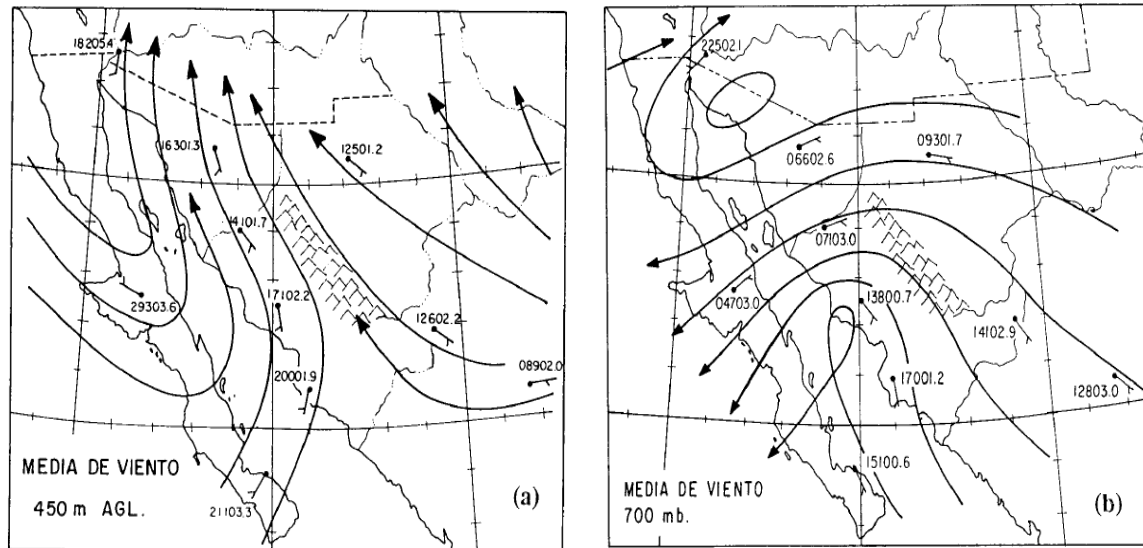


Figura 5. Monzón mexicano. (a) circulación atmosférica para la media del viento a 450 de altura. (b) circulación atmosférica para la media del viento a 700 mbar Tomada y modificada de Reyes et al. (1994).

2.3. Movilización de las partículas del suelo

La movilización de polvo se produce cuando las fuerzas aerodinámicas superan en magnitud a las fuerzas estáticas que tienen la capacidad de mantener tales partículas de polvo agrupadas y adheridas a la superficie del suelo. Una vez que empieza el proceso de erosión, las partículas liberadas y en movilización colisionan con la superficie terrestre, logrando movilizar a otras que aún quedan unidas al suelo (Buschiazzo & Aimar, 2003). Bagnold (1941), desarrollo una expresión matemática que permite describir la movilización de partículas en función de la velocidad mínima o umbral que debe tener el viento para movilizar una partícula de polvo.

$$F = \beta r d^2 = \beta \rho u^2 d^2$$

Dónde:

β = Es un coeficiente adimensional ≈ 10

r = Fuerza de tensión producida por el movimiento turbulento del aire.

d = Diámetro de la partícula de polvo.

u = Velocidad del viento.

ρ = Densidad de la partícula.

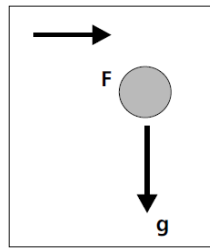


Figura 6. Representación esquemática de las fuerzas que actúan sobre una partícula de suelo que determinan su movilización por el viento según Bagnold (1941).

Otra aproximación matemática hacia la descripción de la movilización de las partículas del suelo la realizó Chepil (1961), quien agregó una componente vertical a la fuerza descrita por Bagnold basándose en la fuerza de succión de Bernoulli. Para Chepil, sobre una partícula de polvo actúan tres fuerzas, una horizontal de atracción y dos verticales opuestas que son la fuerza de gravedad (G) y la de succión (L). La expresión que describe tal planteamiento está dada por:

$$F - p = (G - L)q$$

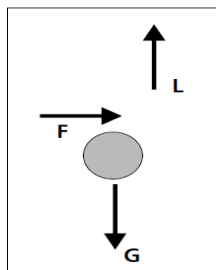


Figura 7. Diagrama de fuerza que actúan sobre una partícula de suelo que determina su movilización por el viento.

Un modelo más generalizado fue el desarrollado por Iverson et al. (1976), quienes trabajaron con base en los modelos de Bagnold y Chepil aplicándolo a partículas más pequeñas en diámetro, encontrando la existencia de fuerzas entre las partículas que se suman a las de gravedad y son opuesta a la fuerza de arrastre del viento y a la fuerza de succión, describiendo tal situación mediante la siguiente expresión:

$$F - p - M = (G - L)q + I_p r$$

Una vez que las partículas de polvo son puestas en movimiento, de acuerdo con su diámetro éstas pueden ser transportadas de tres formas: rodadura, saltación o suspensión (Fig. 8). La suspensión de las partículas de polvo en el aire y la acción del viento permite que éstas alcancen algunos kilómetros de altura y varios centenares de km de distancia. Dependiendo la turbulencia de la viento estas partículas de polvo pueden formar tormentas de polvo (Buschiazzo & Aimar, 2003).

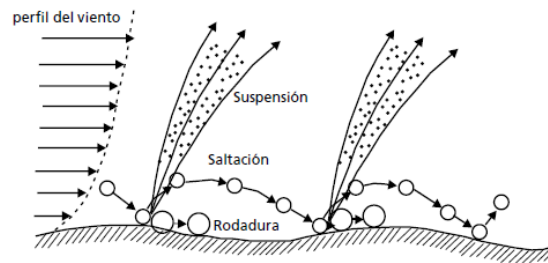


Figura 8. Tipos de transporte eólico. Tomado de, Golberg & Kin (2003).

2.4. Modelos de transporte de polvo

Un modelo es una representación simple de un fenómeno complejo. Es también una abstracción por lo que no contiene todas las características del fenómeno real, no obstante el modelo nos permite comprender todas las características esenciales del fenómeno de tal manera que éste se puede describir y resolver (Soetaert & Herman, 2008). A través de la utilización de imágenes MODIS¹, Miller (2003) desarrolló un algoritmo para la detección de polvo, por otro lado Baddock et al. (2009), identifican las fuentes de polvo a nivel mundial, Mulena et al. (2012), realizaron una modelación de transporte de cenizas volcánicas en Argentina. Allende et al. (2012), implementaron modelaciones para transporte de polvo producido por fuertes vientos en el desierto de Chihuahua, y Martínez et al. (2013), identifican regiones y épocas en el que el transporte de polvo es más probable hacia el Golfo de California. Otro de los aspectos utilizados para el estudio de este fenómeno son los modelos como el WRF/Chem², CALMET, y CALPUFF utilizados para calcular la erosión eólica y el transporte de polvo.

¹ Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS por sus siglas en inglés).

² Weather Research and Forecasting with Chemistry

2.4.1. Modelo HYSPLIT

El modelo híbrido lagrangiano integrado para la trayectoria de una partícula (por sus siglas en inglés, HYSPLIT), es un software que implementa un modelo de cálculo de trayectorias. Este modelo es híbrido pues combina aproximaciones eulerianas para concentraciones en las que emplea las derivadas parciales de una malla, como se aprecia en la parte izquierda de la Figura 8. El método lagrangiano se utiliza para la trayectoria de una partícula en el que emplea derivadas totales como se aprecia en la parte derecha de la Figura 9 (González, 2009).

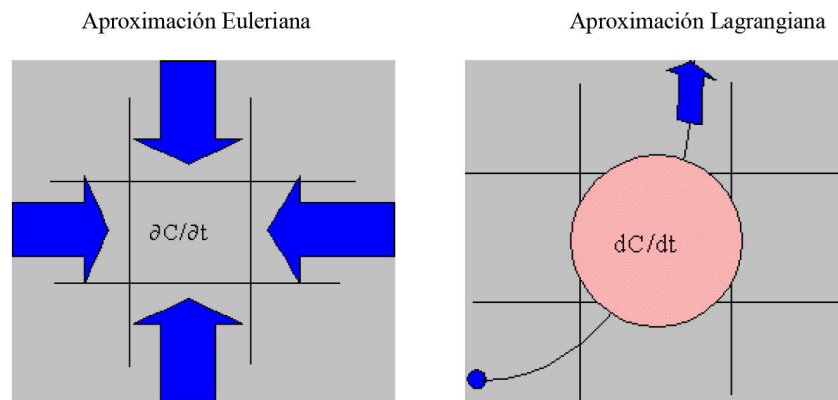


Figura 9. Métodos del cálculo de advección y dispersión (González, 2009).

2.5. Zonas erosivas en el noroeste de México

Una aproximación de las zonas desérticas de Norteamérica fue elaborada por Shreve (1942), en esta se tienen en cuenta las características geográficas y la vegetación predominante para llegar a la conclusión de que existen cuatro grandes zonas desérticas: Desierto de la Gran Cuenca, Desierto de Mojave, Desierto Sonorense, Desierto de Chihuahua (Fig. 10). México tiene suelos con características de desiertos arenosos que están ubicados en su mayoría en la región del Noroeste (Semarnat, 2006).

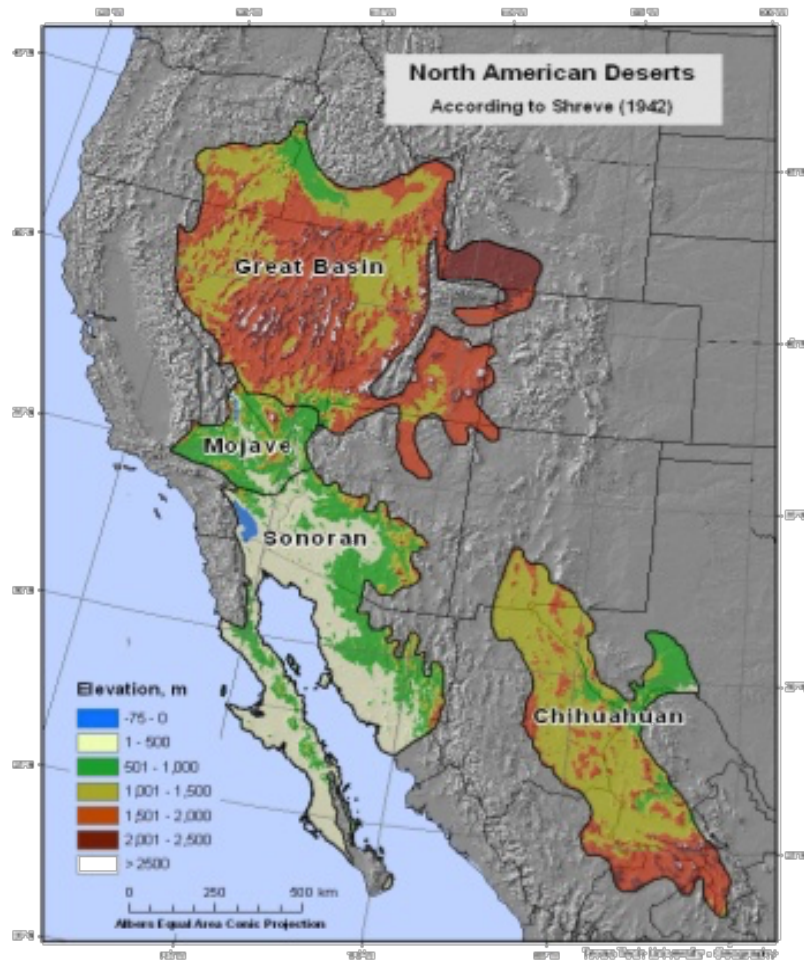


Figura 10. Desiertos de Norteamérica (Shreve, 1942).

En lo referente a los desiertos y su ubicación Shreve (1942), y Álvarez et al. (1995), realizaron una caracterización de los desiertos de Norteamérica y el noroeste de México. Charlotte et al. (2010), tomando como referente los trabajos anteriores realizó una clasificación de las zonas desérticas de la península de Baja California y encontró las siguientes zonas desérticas: Desierto de San Felipe, Desierto Central, Desierto de Vizcaíno, y las planicies de Magdalena conformando entonces una región con zonas desérticas clasificadas para el Noroeste de México como se muestra en la Figura 11.

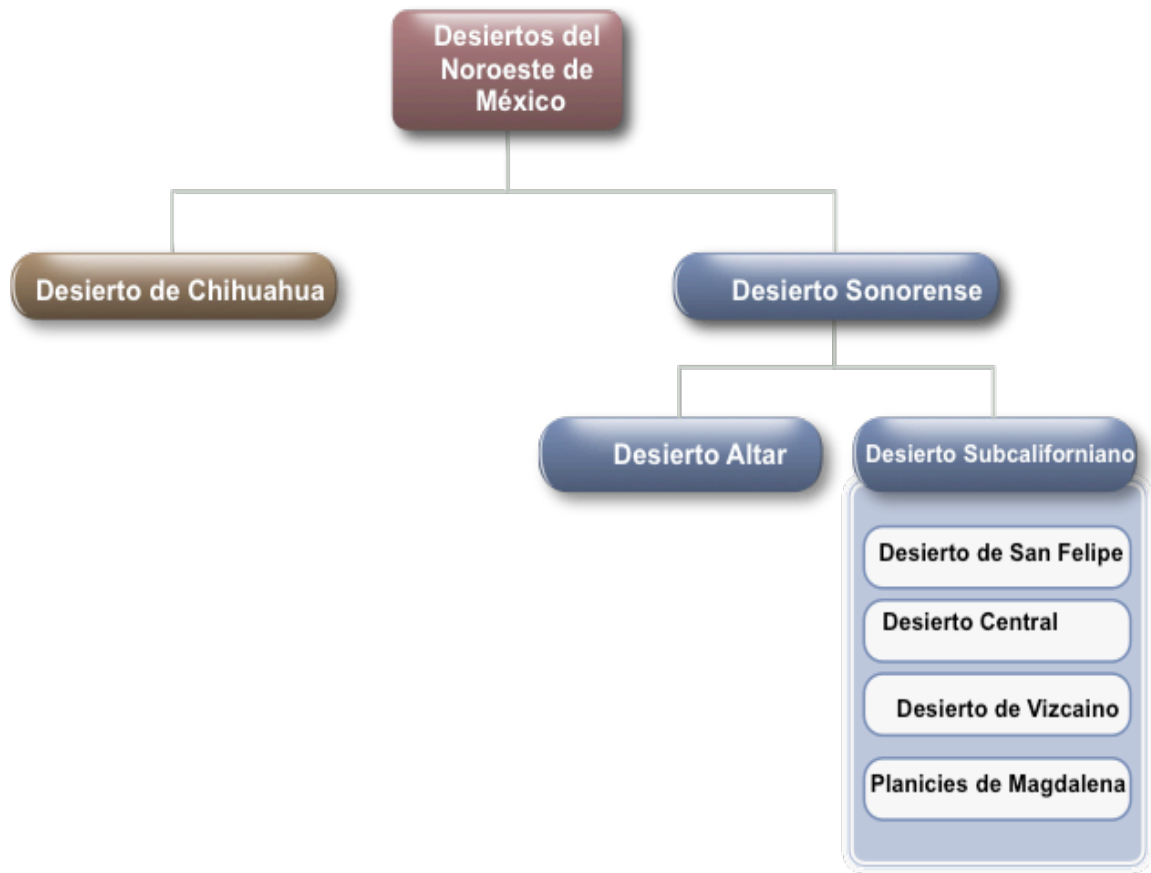


Figura 11. Clasificación de desiertos en el Noroeste de México.

Martínez-Flores & Segovia-Zavala (2013), presentan una clasificación de las zonas desérticas arenosas obtenidas del procesamiento de imágenes MODIS. En la imagen se pueden identificar seis regiones denominadas desde ZD1 a ZD6 (Fig. 12).

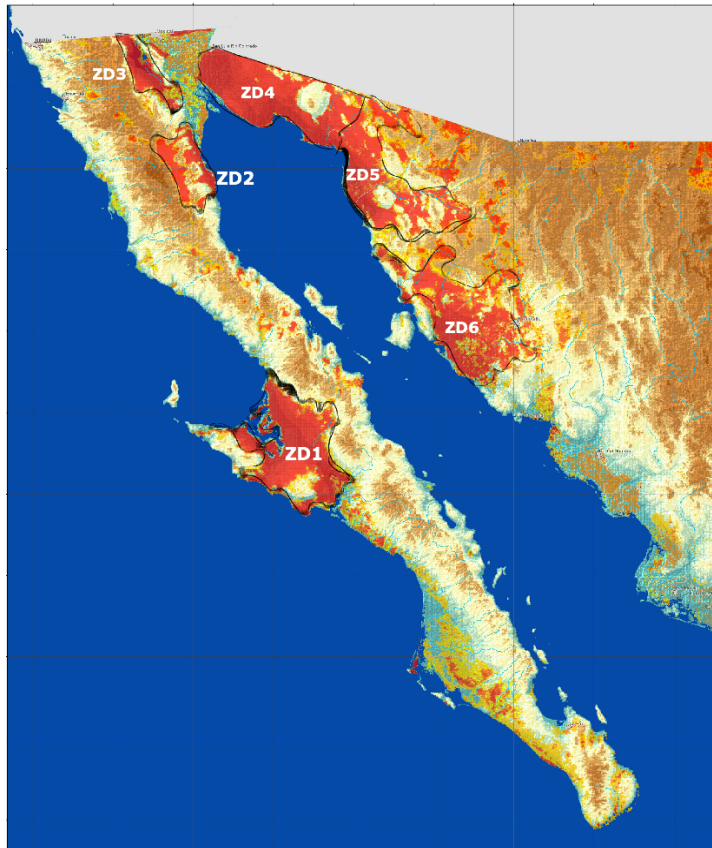


Figura 12. Zona de Desiertos Arenosos del Noroeste de México, tomada y modificada (Martínez-Flores & Segovia-Zavala, 2013).

2.6. Imágenes MODIS

Las imágenes del espectroradiómetro de imágenes de resolución media (por sus siglas en inglés, MODIS) pertenecen a un sensor que se encuentra a bordo de los satélites Terra o EOS-AM (lanzado en diciembre de 1999) y Aqua o EOS-PM (lanzado en mayo de 2002). La órbita de cada plataforma es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98.2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente (NASA MODIS WEB, 2008; Jean-François, 2011). Terra está programado para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 am en su órbita descendente, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 pm. Una representación de la cobertura y especificaciones generales del sensor MODIS se puede apreciar en la Figura 13.

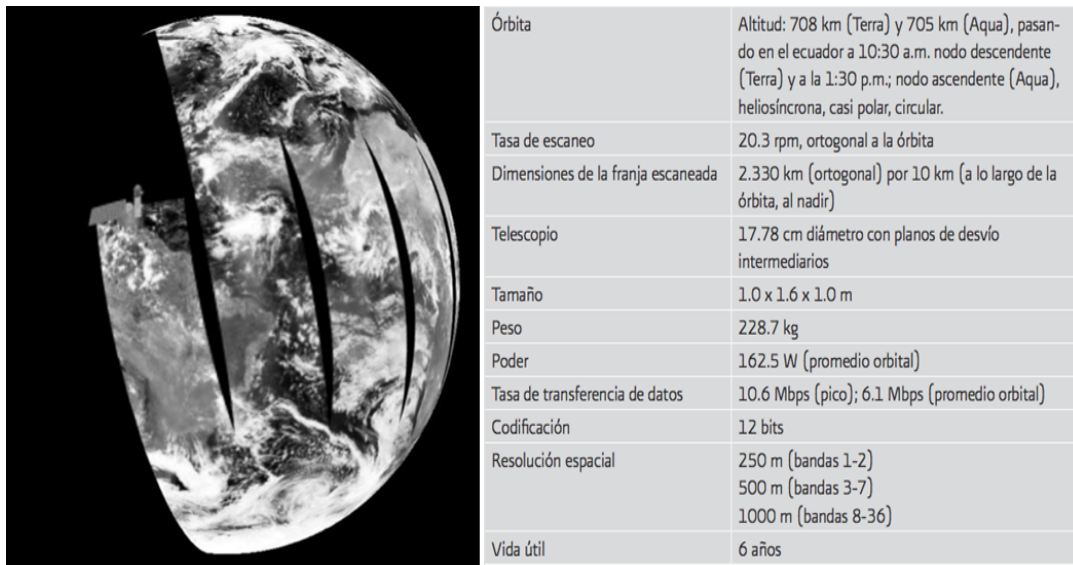


Figura 13. Cobertura y especificaciones generales del MODIS, tomada y modificada (Jean-François, 2011).

El sensor MODIS es un explorador de barrido: un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria con un ángulo de $\pm 55^\circ$ permite explorar una franja de terreno (swath) a ambos lados de la terraza del satélite, cuyo ancho es de 2,330 km.

En este trabajo se incorporan imágenes procesadas para detectar aerosoles en el noroeste de México (Álvarez, 2014). Las características descritas en la tabla. 3, muestran datos de las bandas del sensor MODIS utilizado por Miller (2003), e implementado por Álvarez (2014).

Tabla 2. Datos de las bandas del sensor MODIS y su longitud de onda utilizadas para el algoritmo de Miller (2003). Tomado y modificado de Álvarez (2014).

Canal	Longitud de onda media λ (μm)	Resolución (Km)	Descripción
1	0.645	0.25	Rojo
2	0.853	0.25	IR Reflectivo
3	0.469	0.5	Azul
4	0.555	0.5	Verde
26	1.38	1	Vapor de onda corta
31	11	1	IR Ventana 1
32	12	1	IR Ventana 2

2.7. Área de Estudio

El presente trabajo se desarrolló en la región del noroeste de México (Fig. 13). Políticamente está compuesta por los estados de Durango, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, Baja California Sur y Baja California.

Álvarez et al. (1995), en sus estudios realizados sobre el análisis biogeográfico del noroeste de México con énfasis en la variación climática y mastozoológica, proponen tres grandes áreas: (1) Desierto de Altar o Gran Desierto, circunscrito a la porción colindante con la cabecera del GC y que une a los estados de Sonora y Baja California; (2) Desierto Sonorense, localizado en términos de persistencia en la región que ocupa la Cuenca de Guaymas; y (3) el Desierto Sudcaliforniano comprendido mayormente en la extensión que ocupa el estado de Baja California Sur, excluyendo las regiones elevadas de la Sierra de La Laguna, Sierra la Giganta y Sierra de San Pedro Mártir. En el aparte 2.5 se especifica una clasificación detallada de los desiertos arenosos o zonas erosivas presentes dentro del noroeste de México y que se tendrán en cuenta en este trabajo (ver Figura 12).

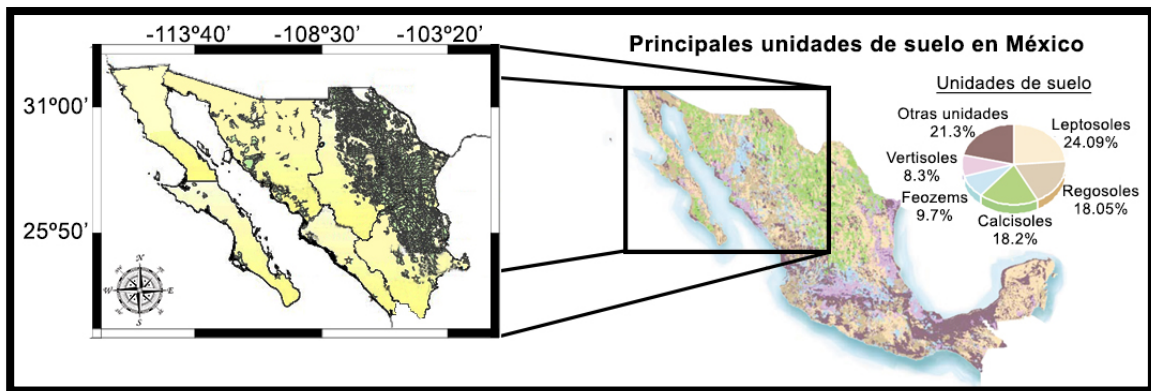


Figura 14. Área de estudio. Principales unidades de suelo en México (derecha) (tomada de SERMANAT, 2006); Mapa elaborado con datos de: Áreas susceptibles a erosión eólica, división política, localidades con densidad de población mayor a 10000 habitantes en el noroeste de México (CONABIO, 2010).

Estas tres áreas áridas, dependiendo de las condiciones climatológicas en cuanto a los incrementos en la temperatura, pueden expandirse o contraerse llegando incluso a formar una sola zona árida en todo el noroeste Mexicano (Estrada-Porrúa, 2001). En México existen 25 de las 30 unidades de suelo

reconocidas por la FAO³, UNESCO⁴, y La ISRIC⁵. En los que se tienen los leptosoles, regosoles, y calcisoles como los de más amplia distribución nacional cubriendo cerca del 60.7% de la superficie del país, incluyendo nuestra zona de estudio (SEMARNAT, 2006).

Los efectos del viento sobre la superficie terrestre representan el 9.5% en los procesos de degradación del suelo y el 89% de los riesgos de pérdida de suelo por erosión potencial eólica en México (SEMARNAT, 2006).

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1 Datos

En este trabajo se emplean fuentes de datos secundarios que facilitan la obtención de los logros planteados en cada uno de los objetivos, estos datos se encuentran disponibles en sitios web que se describirán a continuación.

3.1.1. Datos cartografía digital

Los datos de cartografía digital se obtuvieron de las siguientes fuentes:

- Uso de suelo y vegetación escala 1: 50000. Se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), en formato *shapefile*, con cobertura espacial del territorio mexicano en una proyección cónica de Lambert disponibles en el sitio <ftp://www.inegi.gob.mx>.
- División política estatal, y unidad de suelos (arenosol) escala 1: 1000000 y 1:250000. Se obtuvo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2010), en formato *shapefile*, con cobertura espacial del territorio mexicano en una proyección cónica de Lambert disponibles en el sitio <http://www.conabio.gob.mx>
- Zonas áridas a escala de 1:250000. Se obtuvo del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2012) en formato *shapefile*, con cobertura espacial del territorio nacional en una proyección cónica de Lambert, disponibles en el sitio <http://www.siap.gob.mx/zonas-aridas/>

³ Organización de las naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

⁴ Organización de las Naciones Unidas para la educación, la Ciencia y la Cultura

⁵ Información mundial de suelos (World Soil Information)

3.1.2. Datos de viento

Los datos de viento se obtuvieron de la base de datos del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR, por sus siglas en inglés), disponibles en formato NetCDF en el (sitio <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/NARR>).

La cobertura de estos datos está definida para América del Norte, con resolución espacial de la malla de aproximadamente 0.3° (aproximadamente 32 km), en una malla de 349×277 celdas y 29 niveles de presión atmosférica. La resolución temporal de estos datos es de tres horas, considerando para este trabajo del 01/01/1979 a 31/12/2013.

3.1.3. Imágenes de satélite

Las imágenes de satélite MODIS/Aqua de la NASA se obtienen del sistema LAADS (por sus siglas en inglés, Level1 and Atmosphere Archive and Distribution System). Disponibles en el sitio Web <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>. Las características de las imágenes empleadas en este trabajo se encuentran descritas en la Tabla 2.

3.2. Métodos

Los datos de la cartografía digital fueron procesados en el Sistema de Información Geográfica Quantum GIS (QGIS), permitiendo la identificación de zonas continentales que actúan como fuente de polvo en el noroeste de la república mexicana.

Se utilizó el software MATLAB para generar los mapas vectoriales donde se representaron las secuencias de campos de viento del noroeste de México a partir de los datos del reanálisis NARR.

Las distribuciones vectoriales de los campos de viento permitirán el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la magnitud y dirección del viento, con el fin de obtener la identificación de patrones espaciales y temporales que contribuyan en el transporte de polvo hacia el GC.

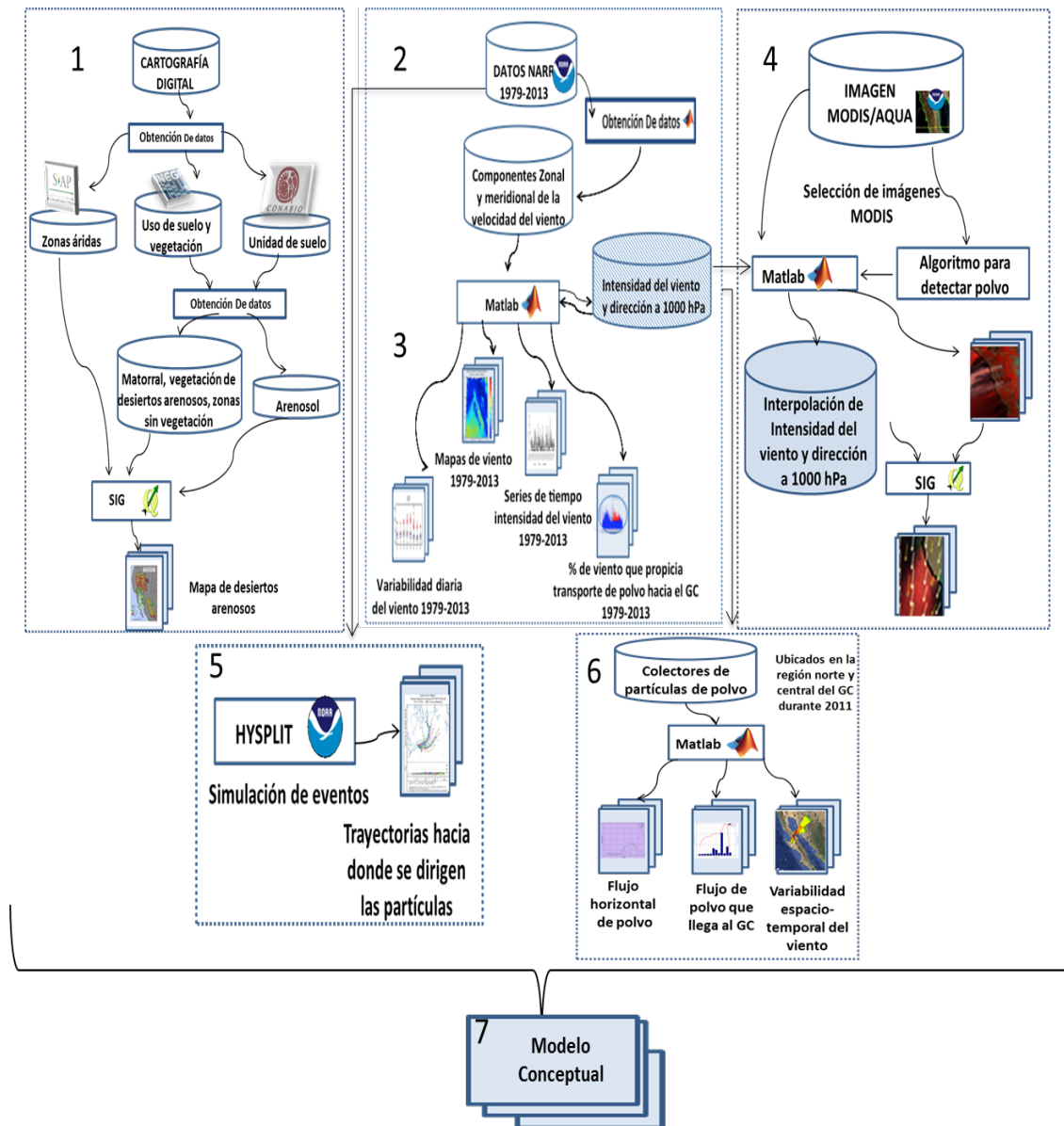


Figura 15. Diagrama conceptual del diseño metodológico general. Se representan los procesos (rectángulos), datos (cilindros) y su relación con cada uno de los objetivos particulares enumerados desde el 1 hasta el 7 como se puede ver en cada uno de los módulos demarcados con el recuadro punteado de color azul.

Se incorporaron imágenes MODIS procesadas en MATLAB tomando como referencia el algoritmo expuesto por Miller (2003) y utilizando las rutinas desarrolladas por García-Álvarez (2014), en la que se emplea una serie de códigos en un lenguaje de programación (MATLAB) para llevar a cabo la detección del polvo sobre la tierra y el océano.

Posteriormente utilizamos un sistema de información geográfica (QGIS) para representar los campos vectoriales generados con MATLAB sobre las imágenes MODIS clasificadas.

Se empleó el modelo HYSPLIT⁶ para visualizar la ruta que siguen las partículas del polvo bajo la influencia del viento desde cada una de las zonas fuente hasta el GC.

Para el estudio de la variabilidad espacio-temporal del flujo y concentración de polvo se emplearon datos (tales como muestras (en gramos), días muestreados y el área del colector) proporcionados por el proyecto CONACYT 2013 (titulado: Flujo atmosférico de metales bioactivos y su solubilidad en el golfo de california: un escenario hacia el cambio climático) en el que se tuvo acceso a tres estaciones distribuidas como aparece en la Figura 16. En cada estación los encargados del proyecto instalaron dos colectores de partículas (PVC) ubicándolos a 5 m de altura, y acoplándolos a estaciones meteorológicas (HOBO U30 STATION) que registraron 13 variables ambientales en tiempo real (velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura, humedad relativa, precipitación, entre otras), los colectores los instalaron siguiendo la metodología expuesta por Segovia-Zavala et al. (2011). La selección de datos la hicieron conforme a lo descrito por Delgadillo-Hinojosa et al. (2006).

Se empleó la metodología propuesta por Flores-Aqueveque et al. (2009) para calcular el flujo parcial mensual de polvo $g_{parcial}$ ($g\ m^{-2}\ mes^{-1}$) que se desplaza con dirección hacia el GC durante el periodo enero-diciembre de 2011. El flujo horizontal total anual (G) de polvo será la suma algebraica de cada uno de los flujos parciales.

$$g_{parcial} = C \left(\frac{m}{A\ d} \right)$$

$C=$	constante de normalización del flujo a escala mensual (=30)
$m=$	masa del material transportado (g)
$A=$	área del colector m^2
$d=$	número de días muestreados

⁶ Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT).

Posteriormente se realizó el análisis de la variabilidad espacio-temporal del viento en cada uno de los puntos de la malla NARR que representaron las ubicaciones de las estaciones donde se encontraban los colectores. Se relacionó la dirección predominante del viento con el flujo de polvo que se dirigía hacia el GC, determinando de esta manera el flujo potencial de polvo que llega hacia la parte norte del GC. Finalmente se propone un modelo conceptual que permita comprender la relación existente entre la variabilidad espacio-temporal del viento, las condiciones del terreno y el transporte de polvo hacia el Golfo de California.

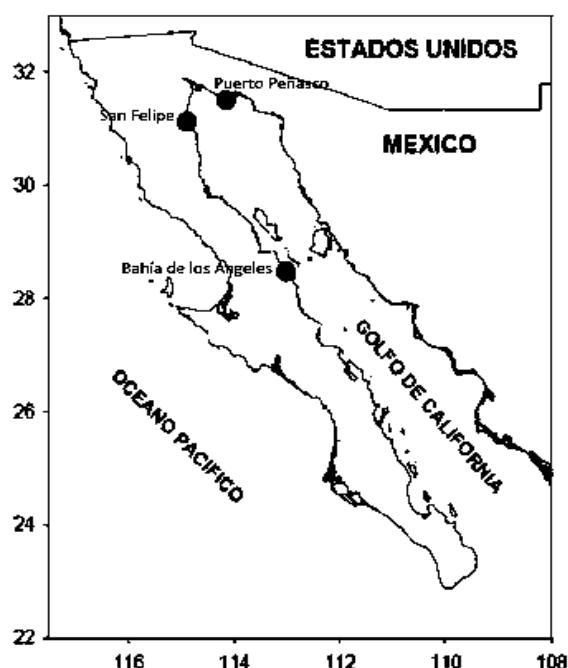


Figura 16. Distribución de los colectores de polvo tomada y modificada de Segovia-Zavala et al. (2011).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Zonas con mayor probabilidad de actuar como fuente de polvo

El identificar los desiertos arenosos permitió, la caracterización de las zonas continentales del NW México que actúan como fuente de polvo. Los tamaños ($<100\ \mu\text{m}$) y densidades (densidad del aire a nivel del mar $\leq 1.2\ \text{Kg/m}^3$) de los sedimentos que componen la capa superficial del suelo en estas regiones permiten la suspensión y transporte eólico.

El tratamiento de los datos de la cartografía digital permitió obtener un mapa (Fig. 17) con regiones del noroeste de México cuyas características: Unidad de suelo (arenosol) (CONABIO, 2010), vegetación predominante (en desiertos arenosos) (INEGI, 2010) y zonas áridas de México (desiertos) (SIAP, 2012); permitieron identificar seis zonas de desiertos arenosos que actúan como fuente de polvo ubicadas alrededor del GC. En este trabajo representamos estas zonas con símbolos (ZD1 hasta ZD6).

Resultados obtenidos en este trabajo ratifican el planteamiento en el que se afirma que a pesar de que las aguas superficiales del GC se encuentran enriquecidas con metales traza, no se puede atribuir este fenómeno a fuentes antropogénicas, debido a que la población y el desarrollo industrial que rodea al GC son incipientes (Delgadillo-Hinojosa, 2000; Díaz-Rodríguez, 2008; Domínguez-Rosas, 2008; Segovia-Zavala et al., 2009).

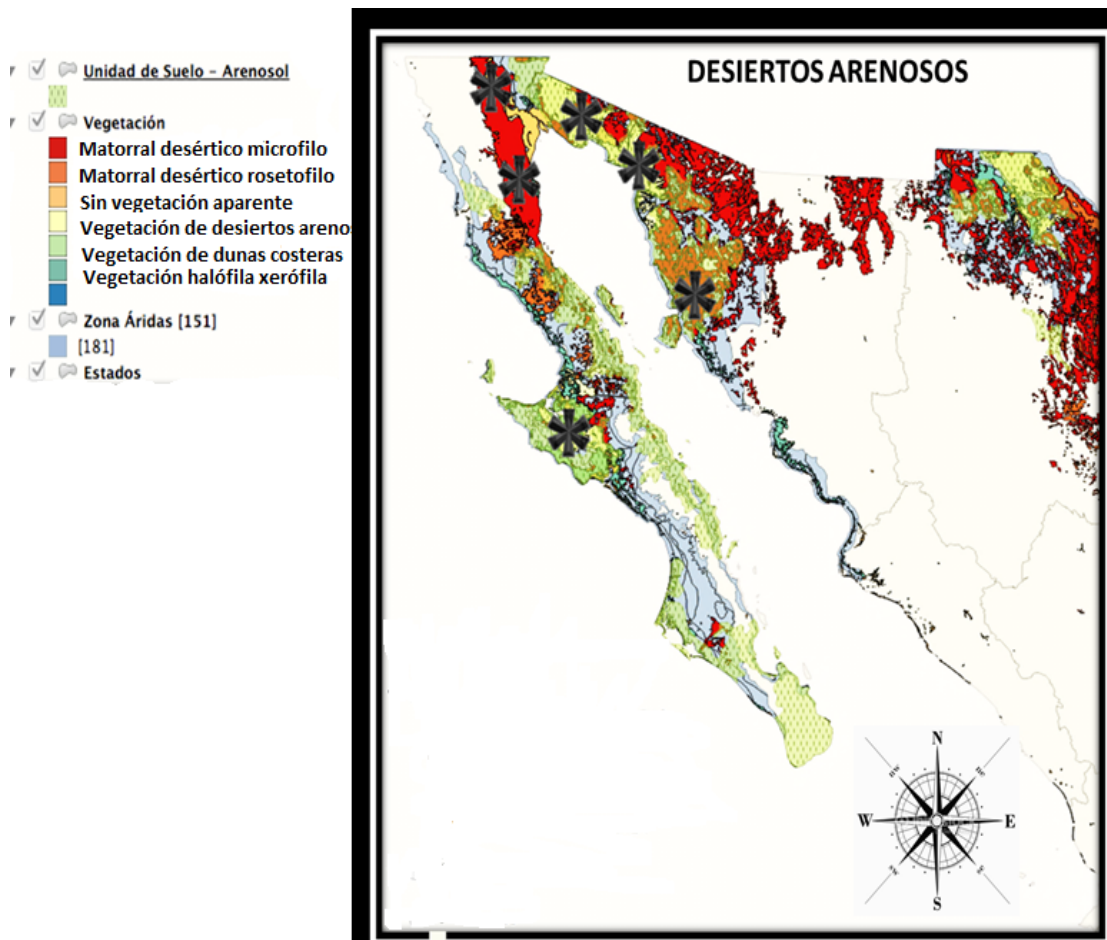


Figura 17. Zonas continentales del NW de México que actúan como fuente de polvo (mapa elaborado con cartografía digital (Tipo de suelo, vegetación, zonas áridas y estados de la República Mexicana) de la CONABIO (2010), INEGI (2010) y SIAP (2012).

Por lo tanto, los aportes potenciales que enriquecen con metales traza las aguas del GC (v.g. Fe de origen continental) corresponden a fuentes y procesos naturales, tales como aportes atmosféricos provenientes de las zonas continentales áridas que rodean al golfo (Bray & Robles 1991; Segovia-Zavala et al., 2009).

4.2. Campos vectoriales de viento

Las partículas de polvo que se encuentran en la superficie terrestre siguen la vía atmosférica como una de sus principales rutas de aporte del continente hacia el mar (Turner et al., 2001; Segovia-Zavala et al., 2009). Douglas et al. (1993), atribuyen el aporte de material terrígeno continental que llega al GC al viento que fluye a lo largo de éste durante todo el año.

Se obtuvo una secuencia de imágenes cada 3 horas para los campos de viento en el noroeste de México durante el periodo del 01/01/1979 al 31/12/2013. En estos campos se observan las componentes zonal y meridional (u , v), así como la magnitud ($m\ s^{-1}$) de la velocidad del viento. Para los meses de verano e invierno se evidencia el comportamiento estacional en cuanto a la dirección y velocidad del viento únicamente en el GC (v.g. García, 1985; Reyes & Lavín, 1997), no obstante García-Escobar (1985) y Reyes & Lavín (1997), afirman mediante el uso de promedios estacionales que el comportamiento en cuanto a la dirección del viento se presenta en todo el noroeste de la república mexicana. La observación detallada y minuciosa de cada una de las imágenes obtenidas para el periodo de estudio y basándonos en el ejemplo seleccionado aleatoriamente de la Figura 18 y en el que se muestran meses representativos de las estaciones (invierno, verano, primavera y otoño) además de horas tomadas al azar, se puede afirmar cualitativamente que:

- Durante el verano predominan vientos desde el océano Pacífico hacia el GC mientras que los meses de invierno se invierte este comportamiento (Fig. 18a y 18c). En la zona continental oriental adyacente al GC, la dirección predominante de los vientos durante el invierno es de la costa hacia la región marina (vientos provenientes del Este) y del GC hacia la costa (vientos del suroeste) durante el verano, tal como lo afirman Badan-Dangond et al. (1991).

- Los máximos valores para la intensidad del viento (≥ 10 m/s) predominan dentro del GC y en las regiones continentales correspondientes a los estados de Baja California, Sonora y el norte de Baja California Sur. En el Pacífico Sudcaliforniano, denominado así por Lara-Lara et al. (2008), predomina el viento con magnitudes ≥ 10 m/s y dirección (noroeste-suroeste) como se puede ver en la Figura 18.
- La región continental del noroccidente mexicano específicamente en los estados de Sinaloa y Nayarit, la circulación del viento muestra un comportamiento predominante desde el GC hacia el continente. Para los meses de verano e invierno la dirección predominante es paralela a la costa con la diferencia que en el primero predomina la dirección Suroeste-Noreste y para el segundo Noreste-Suroeste.

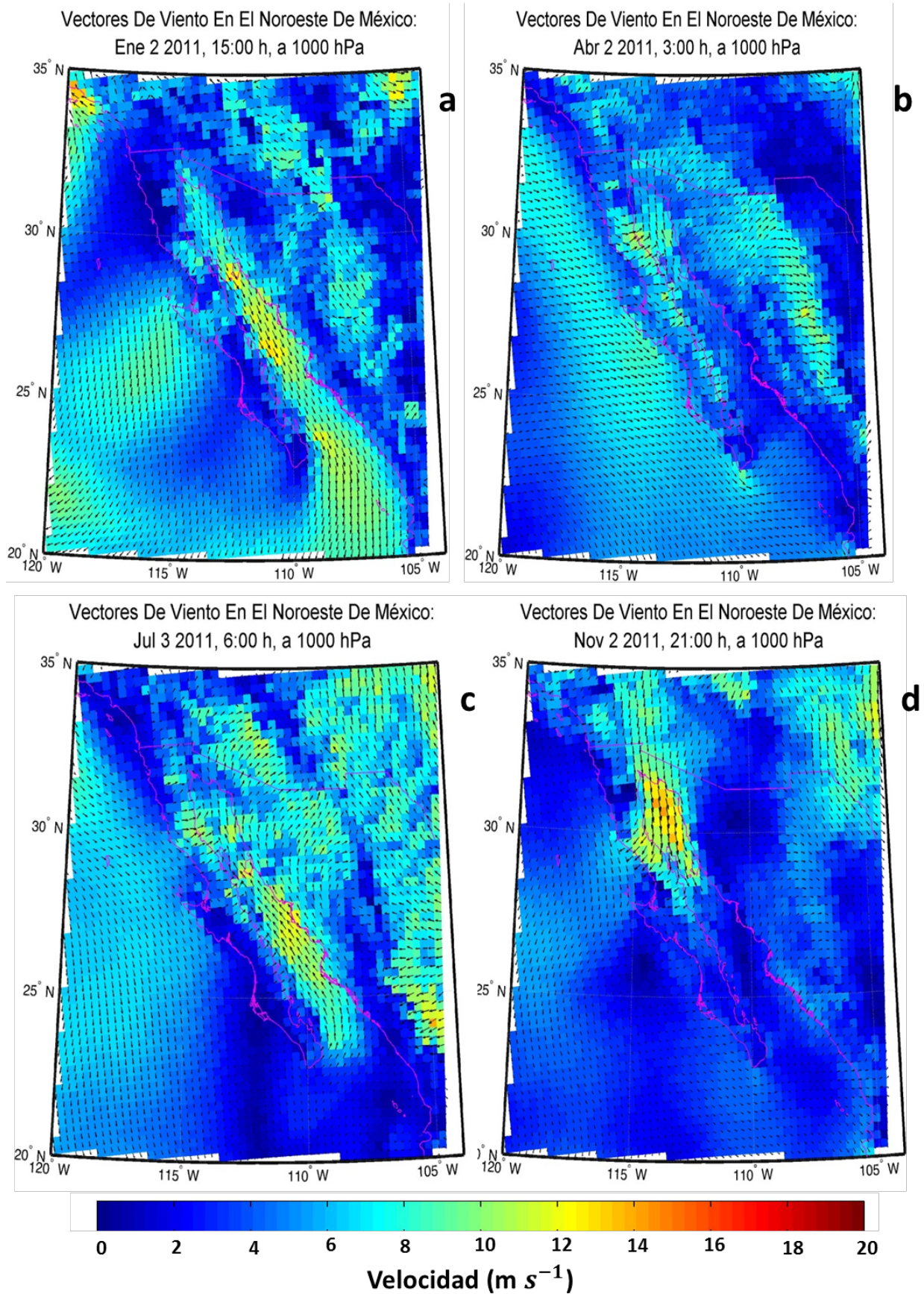


Figura 18. Mapas de campos vectoriales de viento en el Noroeste de México.

4.3. Variabilidad de los campos de viento

El análisis de los campos de viento se realizó mediante el uso de diferentes escalas espaciales, regional (noroeste de México) y local (las seis zonas de desiertos arenosos), y dos escalas temporales (meses y horas), que nos permitieron identificar la influencia de estos campos de viento en el transporte de polvo hacia el Golfo de California. A continuación se presentan los resultados de estos análisis.

4.3.1. Variación mensual de la velocidad del viento

Se define como velocidad al cociente del desplazamiento y el intervalo de tiempo transcurrido (Serway & Faughn, 2001). Para nuestro caso se refiere al desplazamiento de las masas de aire en un intervalo de tiempo (horas, días o meses).

Se obtienen 12 gráficas (Fig.19) que representan la velocidad mensual del viento en el noroeste de México para el periodo 1979-2013.

La variabilidad interanual de la magnitud de la velocidad del viento permite observar en el mes de marzo el valor promedio máximo y mínimo con valores de $\approx 8 \text{ m s}^{-1}$ (para los años 1991 y 2007) y $\approx 0.5 \text{ m s}^{-1}$ (para 1980). El mes en el que se observa menor variabilidad es junio.

Los meses en los que existen condiciones de viento con intensidades promedio $\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$ son: enero, febrero, abril, mayo, noviembre y diciembre.

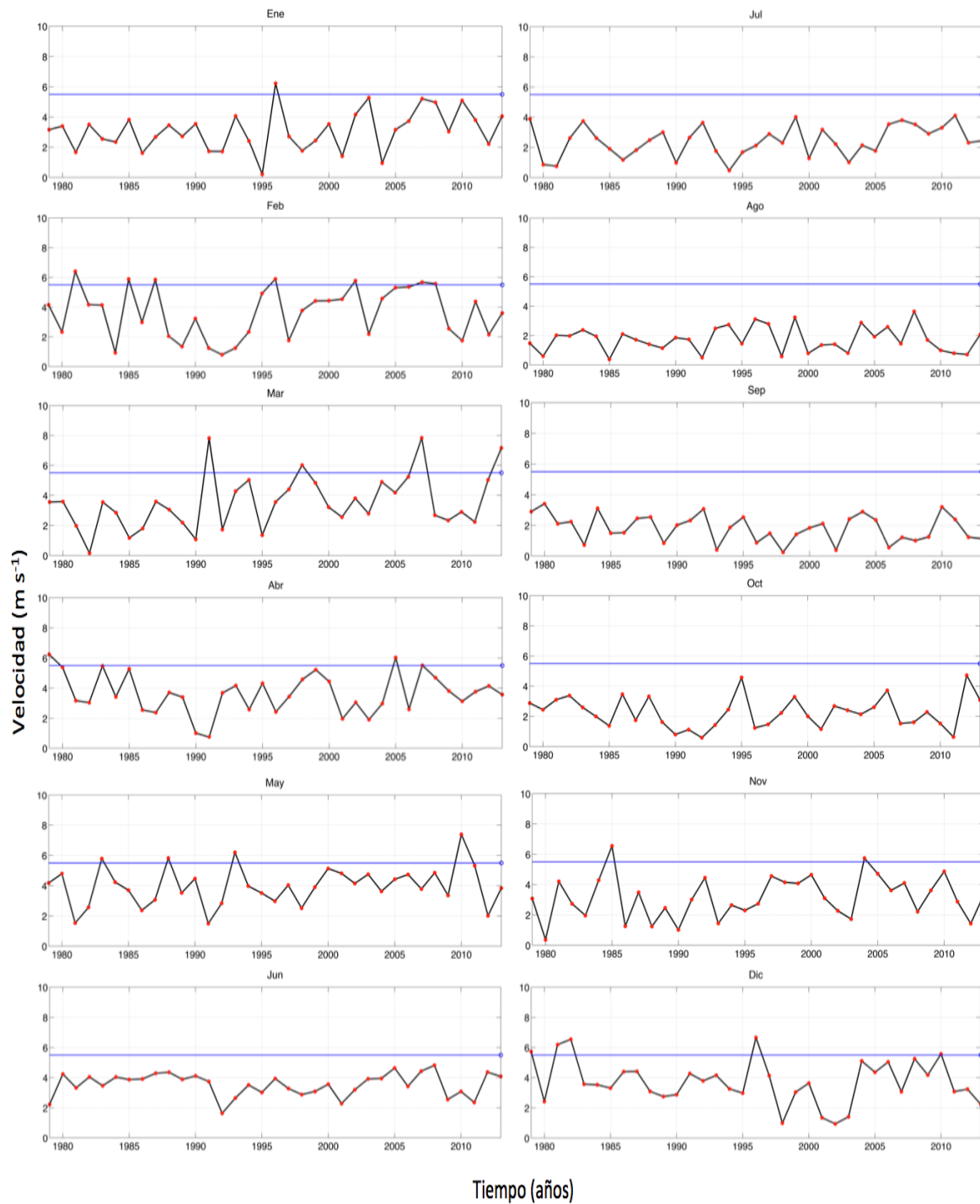


Figura 19. Promedio mensual de la magnitud de la velocidad del viento (m/s) 1979-2013 a 1000 hPa.

4.3.2. Organización de los datos de viento por zonas de estudio

Debido a la geometría (polígonos irregulares) que presenta cada una de las áreas que conforman las regiones de desiertos arenosos, se elaboró una máscara con la finalidad de seleccionar la mayor cantidad de puntos de malla

de la base de datos de viento del modelo NARR cuya resolución espacial es de aproximadamente 32 km y extraer los datos de viento de cada zona (Fig. 20b).

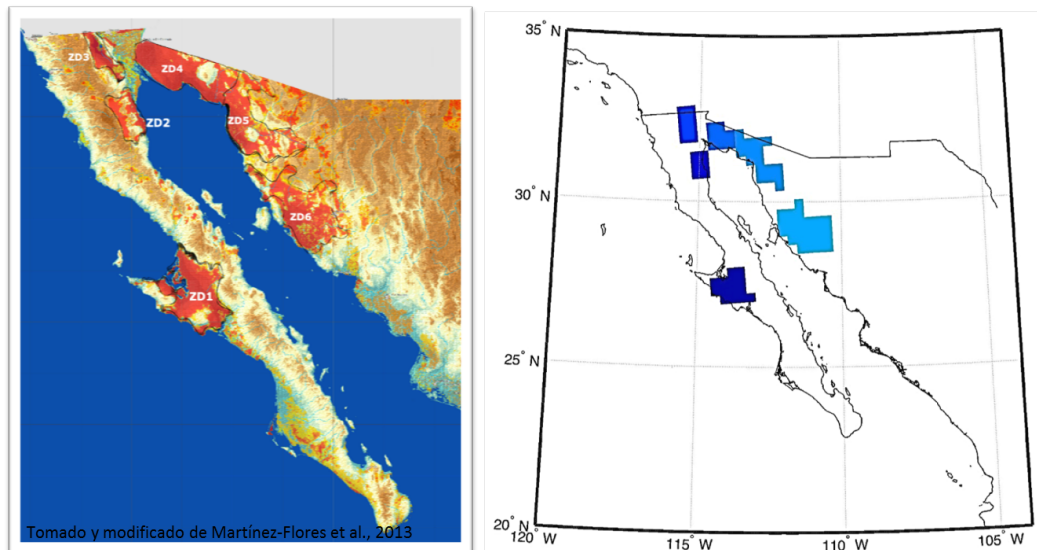


Figura 20. Mascara para la extracción de datos de viento por zona de estudio. (a) Desiertos arenosos del noroeste de México; (b) Mascara con pixeles que ocupan cada región de desierto arenoso.

Se obtiene un conjunto de archivos en formato de texto en los que se presentan los vectores meridional y zonal del viento, la magnitud de la velocidad del viento y su dirección. Este tipo de archivo conformado se obtuvo para el periodo 1979-2013.

4.3.3. Variación mensual de la velocidad del viento en las zonas fuente

Los vientos fluyen a lo largo del golfo durante todo el año aportándole material particulado de origen continental (Douglas et al., 1993). Una vez ubicadas las seis zonas continentales del noroeste de México que son más susceptibles para actuar como fuente de polvo, se analizó la variación mensual del viento en cada una de ellas. Los resultados obtenidos se presentan en gráficas de promedios mensuales de la magnitud de la velocidad por zona para el periodo 1979-2013 (Fig. 21). Se consideró un valor umbral para la magnitud de la velocidad del viento (5.5 m s^{-1}) a partir del cual los efectos del viento sobre la superficie terrestre permiten el levantamiento de polvo (Beaufort, 1806) y está representado con una línea roja. En el anexo. 2, se muestran las secuencias de los meses restantes desde 1979-2013.

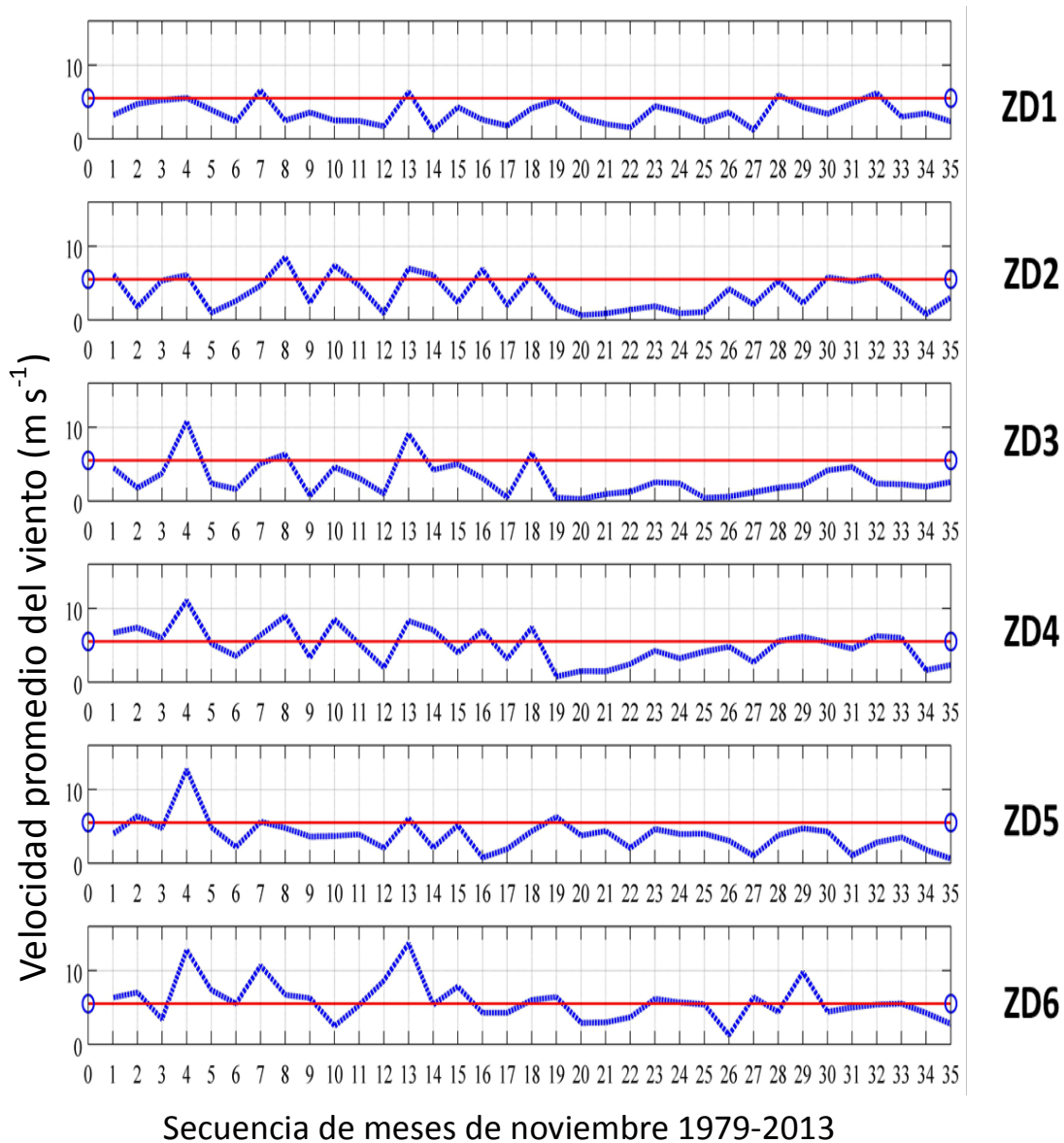


Figura 21. Promedio mensual de la magnitud del viento en cada una de las zonas desérticas. Secuencia de meses de noviembre de 1979-2013 (línea azul), la línea roja representa el valor umbral de la velocidad del viento (5.5 m s^{-1}).

Después de cuantificar el número de veces en los que la magnitud de la velocidad del viento fue mayor o igual al valor umbral, se obtuvo un registro (Tabla 3) con el que se pudo realizar análisis porcentuales sobre las condiciones que propician la erosión eólica en cada una de las zonas que potencialmente actúan como fuente de polvo.

Tabla 3. Frecuencia mensual en que el promedio de la magnitud de la velocidad del viento es $\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$ en cada una de las zonas desérticas identificadas para el periodo de 1979-2013.

Zonas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total por zona 1979-2013
ZD1	9	10	5	6	9	7	3	2	5	7	6	3	72
ZD2	5	3	5	1	1	1	0	1	2	5	12	3	39
ZD3	4	5	4	4	1	0	0	2	1	2	5	0	28
ZD4	14	8	9	7	13	19	24	20	13	9	18	12	166
ZD5	13	5	9	7	7	10	2	3	7	3	5	2	73
ZD6	19	22	21	23	24	15	4	5	10	19	22	15	199
TOTAL MES	64	53	53	48	55	52	33	33	38	45	68	35	577

Los porcentajes en los que las condiciones de intensidad del viento ($\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$) permiten la erosión eólica (Tabla 4) indican que las zonas con mayor porcentaje son ZD4, ZD5 y ZD6 con valores que oscilan desde 5.71% hasta 72.72%.

Los meses en los que se presentan los porcentajes más altos de condiciones de intensidad de viento que propician la erosión eólica son julio y agosto con valores de 72.72% y 60.6% encontrados en la ZD4.

Tabla 4. Porcentaje mensual de intensidad de viento que propicia la erosión eólica.

Zona	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
ZD1	14.06	18.86	9.43	12.5	16.3	13.4	9.09	6.06	13.15	15.55	8.82	8.57
ZD2	7.81	5.66	9.43	2.08	1.18	1.92	0	3.03	5.26	11.11	17.64	8.57
ZD3	6.25	9.43	7.57	8.33	1.18		0	6.06	2.63	4.44	7.35	0
ZD4	21.87	15.09	16.9	14.5	23.6	36.5	72.72	60.6	34.21	20	26.47	34.28
ZD5	20.31	9.43	16.9	14.5	12.7	19.2	6.06	9.09	18.42	6.66	7.35	5.71
ZD6	29.68	41.5	39.6	47.9	43.6	28.8	12.12	15.15	26.31	42.22	32.35	42.85

Las zonas desérticas que durante el periodo 1979-2013 presentan un mayor porcentaje de viento que propicia la erosión eólica (Tabla 5) son: ZD4, ZD5 y ZD6 con porcentajes entre 12.53% y 34.48%.

Tabla 5. Zona desértica con mayor porcentaje de viento que propicia la erosión eólica.

ZONAS	TOTAL DE DATOS POR ZONAS	PORCENTAJE
ZD1	72	12.47
ZD2	39	6.75
ZD3	28	5.02
ZD4	166	28.74
ZD5	73	12.53
ZD6	199	34.48

4.3.4. Condición del viento que propicia el transporte polvo hacia el GC

Se clasificaron los datos de viento por intervalos de dirección (Fig. 22), seleccionando aquellos cuya velocidad fuese mayor o igual a 5.5 m s^{-1} . Esto se realizó para cada una de las regiones referidas previamente para obtener el porcentaje de registros de viento que durante el periodo 1979-2013 presentaron condiciones (magnitud y dirección) para el transporte de polvo al GC.

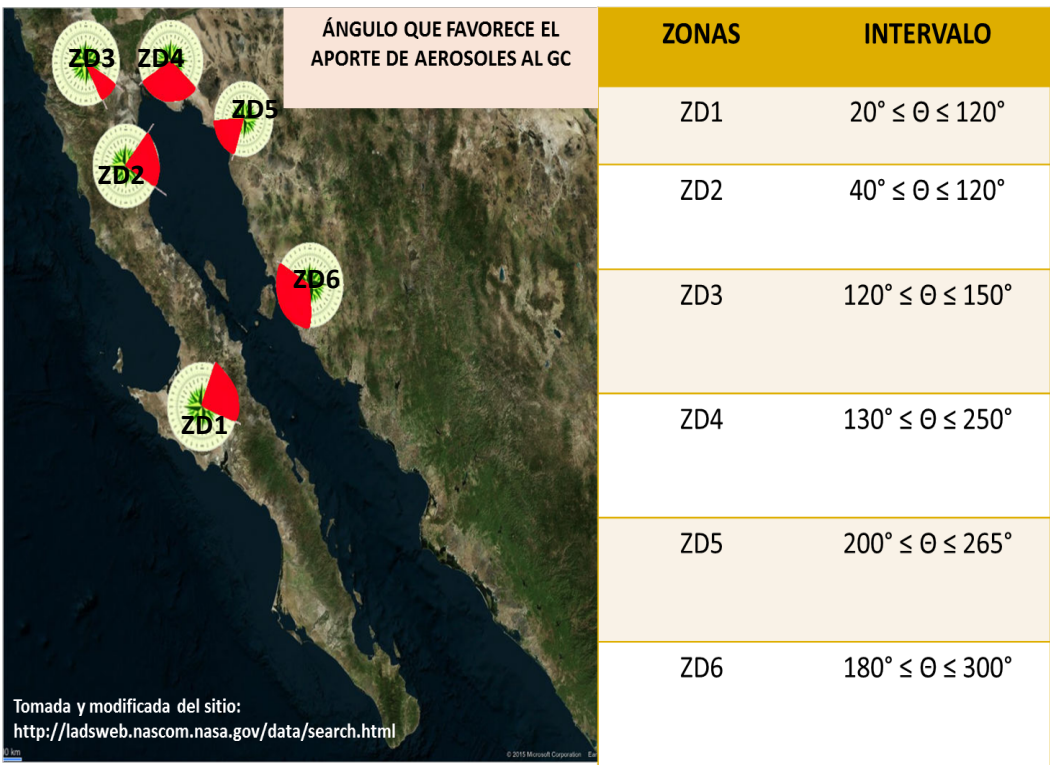


Figura 22. Dirección del viento que propicia el transporte de polvo hacia el GC desde cada una de las zonas de estudio.

La Figura. 23 muestra el tipo de gráficas obtenidas durante el procedimiento de selección de datos de viento según los criterios de magnitud y dirección del

viento antes mencionados, para cada caso de estudio. A partir de éstos se obtienen los porcentajes que estos datos representan por mes en cada región (Tabla 6).

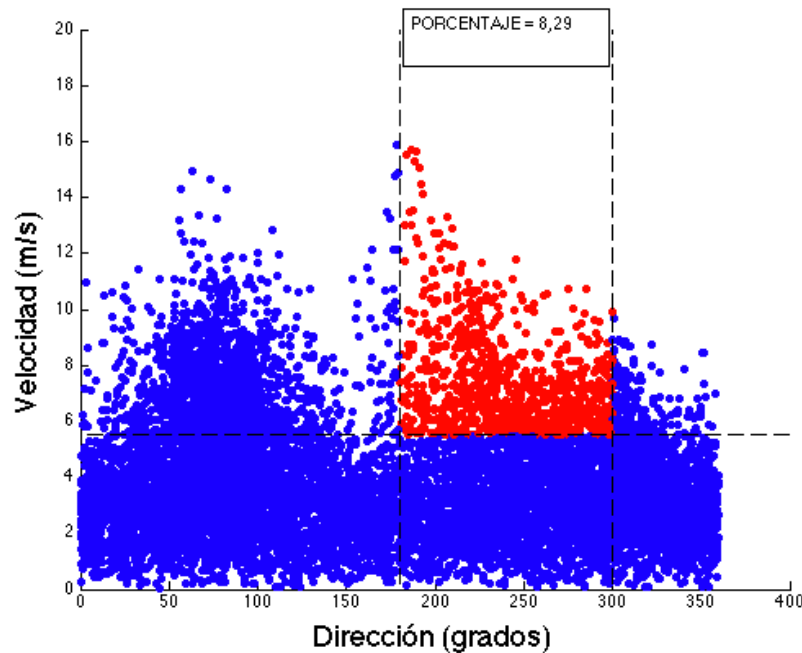


Figura 23. Porcentaje de viento que propicia el transporte de polvo al GC, zona ZD6, noviembre de 2011. Con rojo se muestran los datos que cumplen con la condición de dirección ($180^{\circ} \leq \theta \leq 300^{\circ}$) e intensidad del viento ($\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$).

Los porcentajes totales para cada una de las zonas de estudio en el periodo correspondiente a 1979-2013 se presentan de manera cuantificada en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de viento que cumple con la condición de intensidad ($\geq 5.5 \text{ m s}^{-1}$) y dirección (hacia el GC) para propiciar el transporte de polvo al GC para el periodo 1979-2013 en cada una de las zonas fuente.

ZONAS FUENTE	porcentaje por zona de estudio 1979-2013
ZD1	9.77
ZD2	12.18
ZD3	5.35
ZD4	48.81
ZD5	7.16
ZD6	16.73
Total	100

Estos resultados muestran que la zona con mayor porcentaje de actuar como fuente de polvo es la zona ZD4 ($\approx 48.8\%$), mientras que la de menor porcentaje es la zona ZD3 ($\approx 5.35\%$).

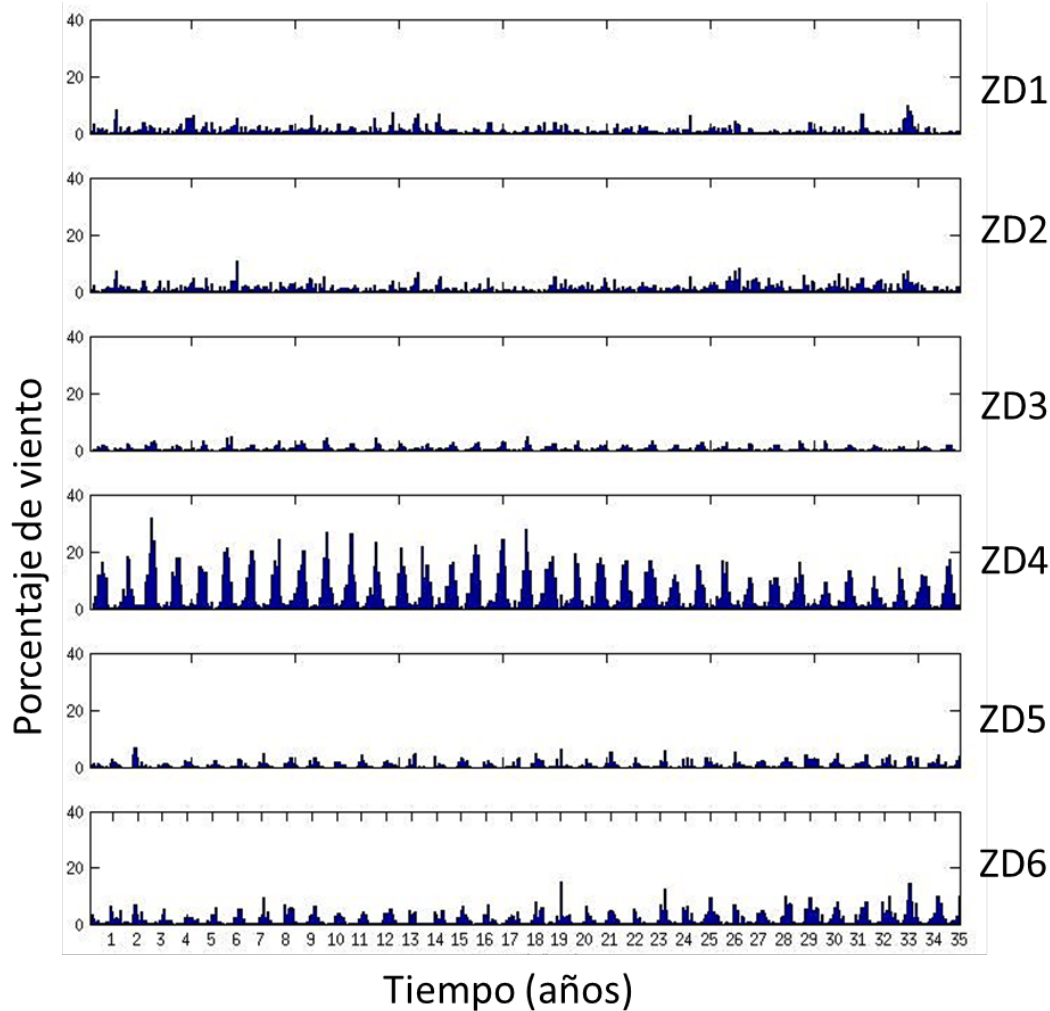


Figura 24. Porcentaje de viento que propicia el transporte de polvo al GC, y cumplen con la condición de dirección e intensidad del viento desde cada una de las zonas fuente.

4.3.5. Variación diaria de la velocidad del viento en las zonas fuente

Se analizó la variabilidad diaria de la magnitud de la velocidad del viento para los ocho registros diarios correspondientes a la resolución temporal de los datos del NARR.

Se obtienen seis diagramas estadísticos (uno para cada zona de estudio) en el que se agrupan la magnitud de la velocidad del viento por registro horario (cada 3 h, 1979-2013). La estructura de estos diagramas de caja y bigote se explican en el anexo 3.

Los valores atípicos encontrados en cada una de las regiones indican máximos valores de la magnitud del viento que oscilan entre 8 y 20 m s⁻¹.

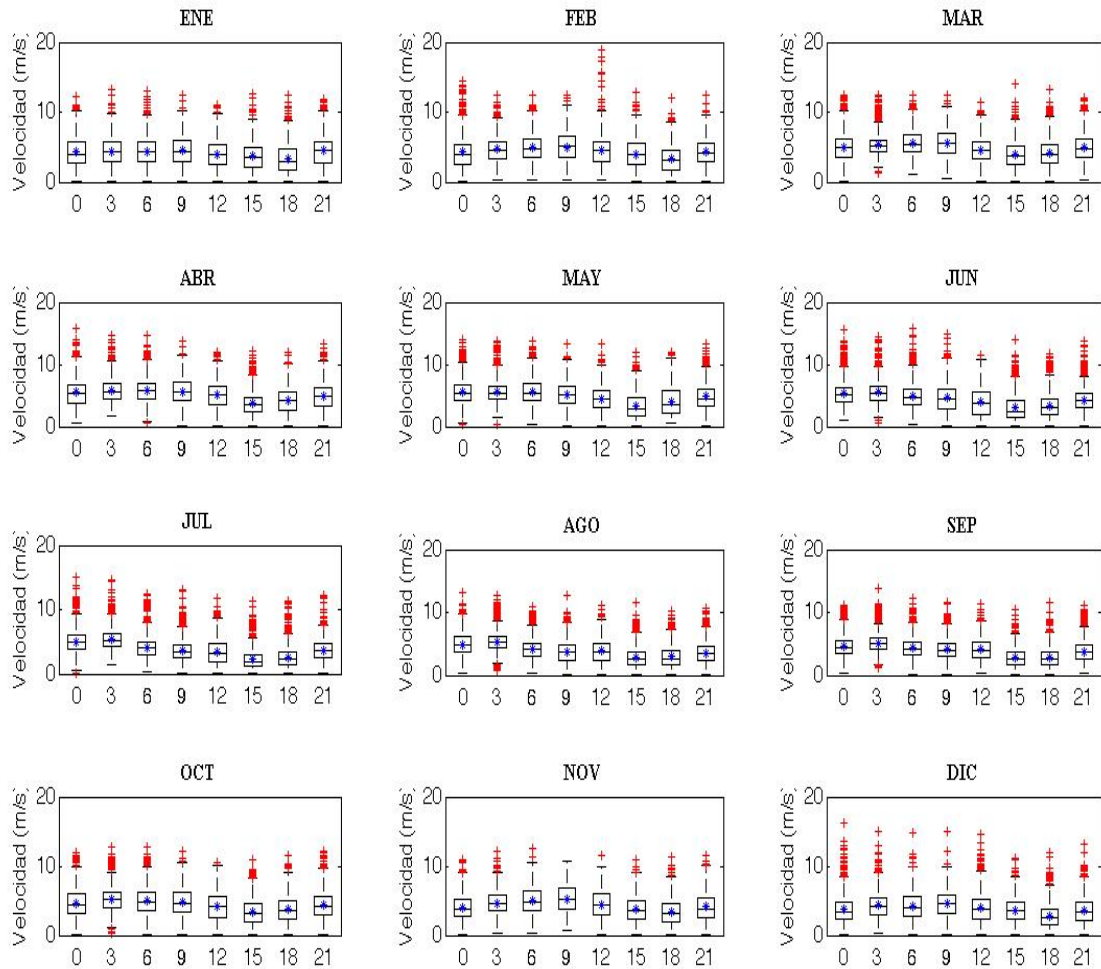


Figura 25. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la región ZD1, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.

En la zona ZD1, los meses en los predominan condiciones de viento (≥ 5.5 m s⁻¹) son febrero, mayo y octubre, además los registros horarios que presentan estas condiciones de velocidad umbral corresponden a los cinco primeros registros del día de cada uno de los meses estudiados para los 35 años.

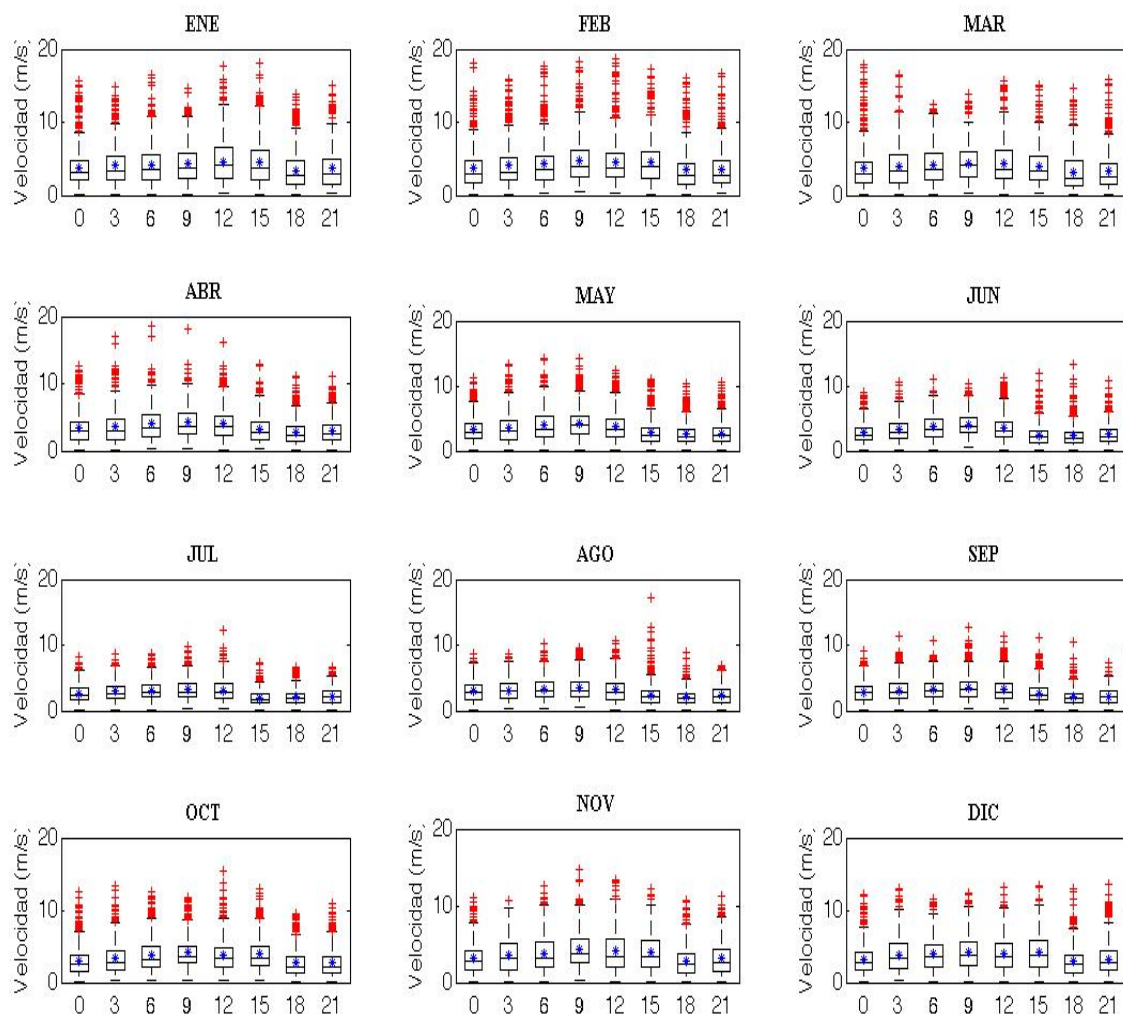


Figura 26. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la zona ZD2, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.

Las condiciones de intensidad del viento que propician eventos de erosión eólica en la zona ZD2 se presentan durante los meses: enero, febrero, marzo, agosto y octubre. Y las horas del día en el que se dan estos eventos corresponden a 6:00, 9:00, 12:00 y 15:00 horas (Fig. 26).

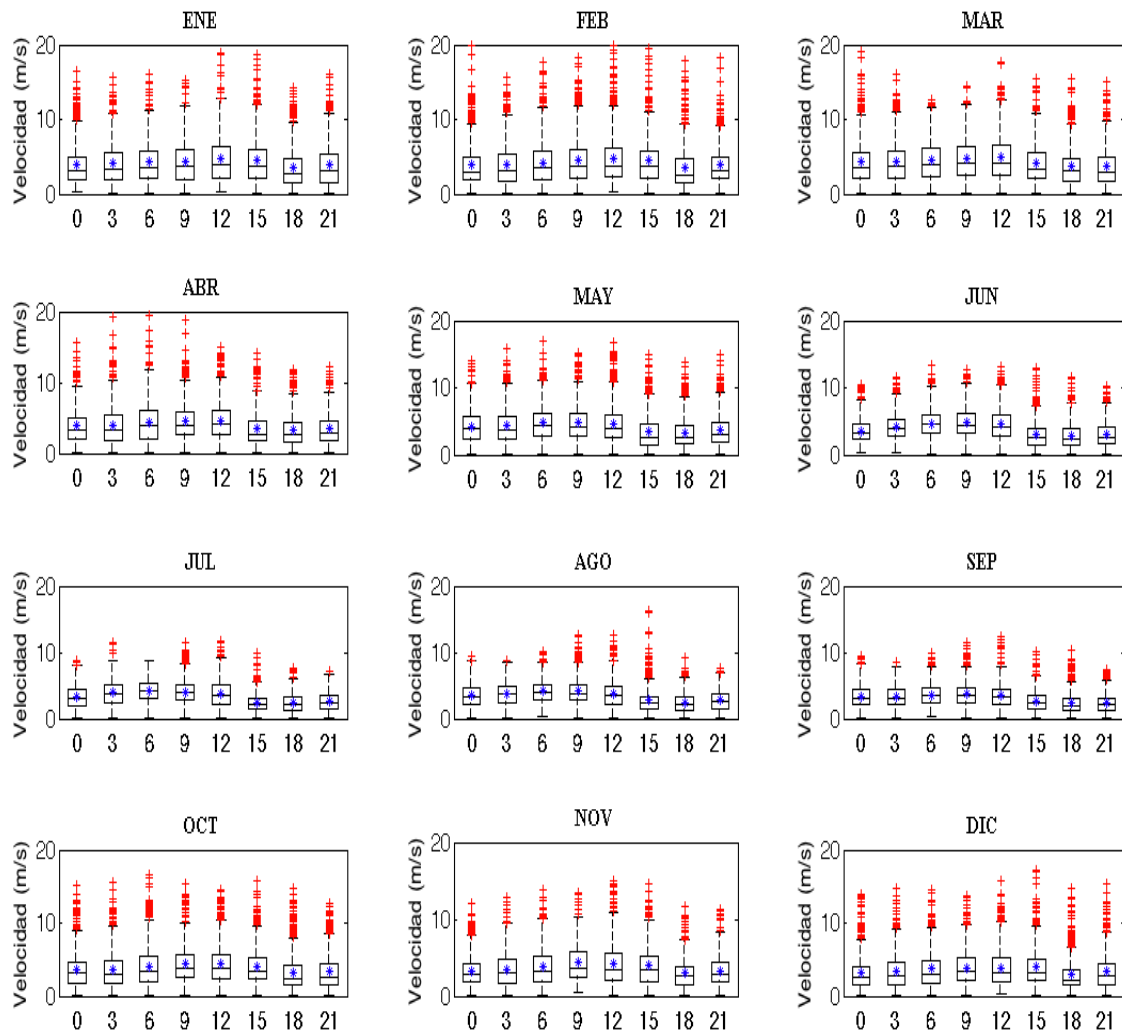


Figura 27. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la zona ZD3, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.

Los diagramas (Fig. 27) muestran a febrero, marzo, abril y noviembre como los meses en los que predominan las condiciones de intensidad de viento antes mencionadas y que propician eventos de levantamiento de polvo desde la superficie del suelo. Febrero, marzo y abril presentan los valores máximos en la magnitud de la velocidad del viento y una preferencia horaria de 0:00 a las 12:00 horas para estas condiciones. Octubre, noviembre y diciembre presentan también el mismo comportamiento en cuanto a los máximos de la magnitud de la velocidad del viento, cantidad de valores atípicos en ese rango y horas de preferencia para tales valores de 6:00 a 15:00 horas.

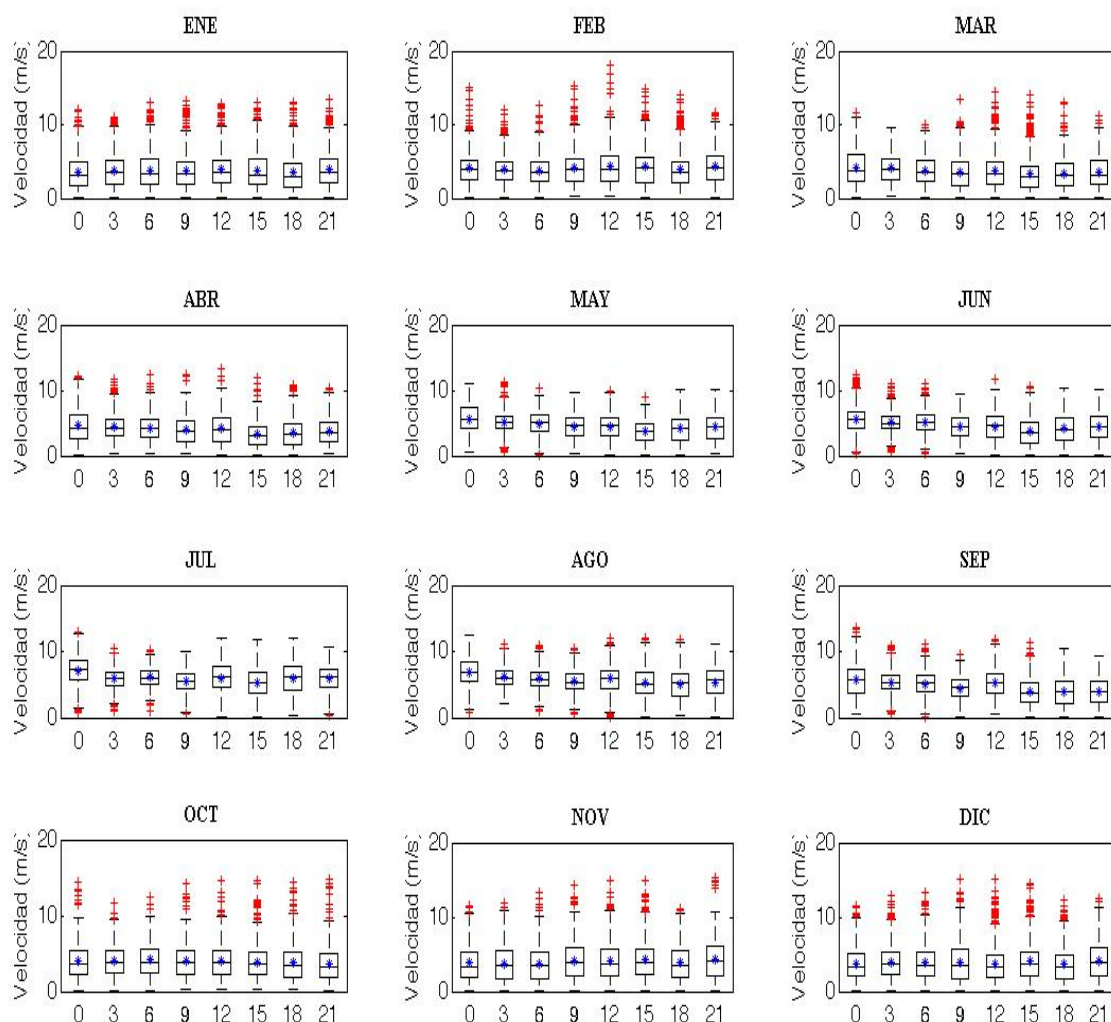


Figura 28. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la zona ZD4, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registro.

Para ZD4 (Fig. 28), la velocidad del viento se muestra con menor variabilidad con condiciones de viento (intensidad) que propician eventos de erosión eólica para los meses de junio, julio y agosto. Los meses que presentan valores atípicos en la magnitud de la velocidad del viento (15 m s^{-1}) son octubre, noviembre, diciembre y febrero. Los meses de enero y marzo tienen valores atípicos desde las 9:00 hasta las 18:00 horas.

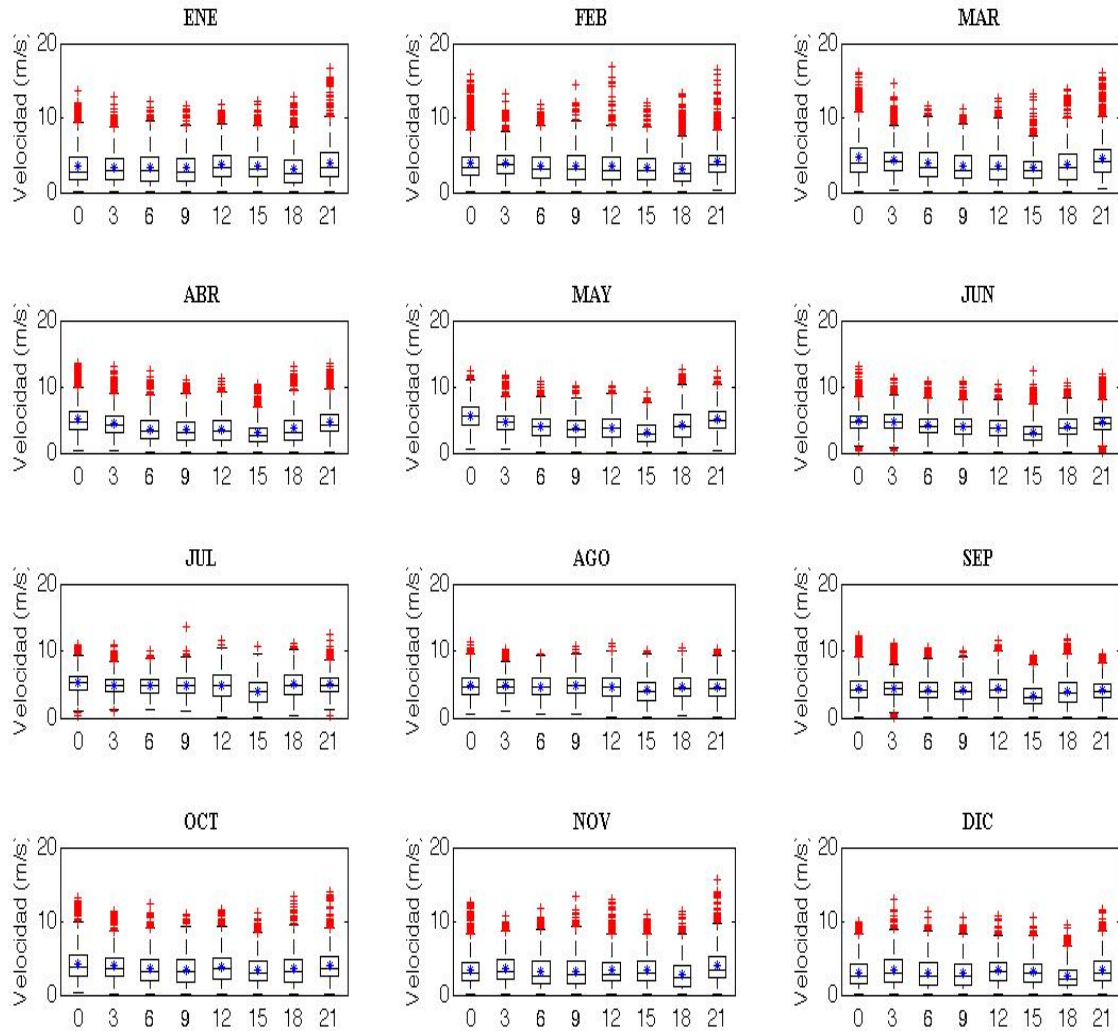


Figura 29. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la zona ZD5, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.

La menor variabilidad en cuanto a la intensidad del viento para la zona ZD5 (Fig. 29) se presenta en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre. Los meses en los que se muestran los valores máximos para la magnitud de la velocidad del viento son enero, febrero, marzo y noviembre con horas de preferencia entre las 9:00 y las 15:00 h.

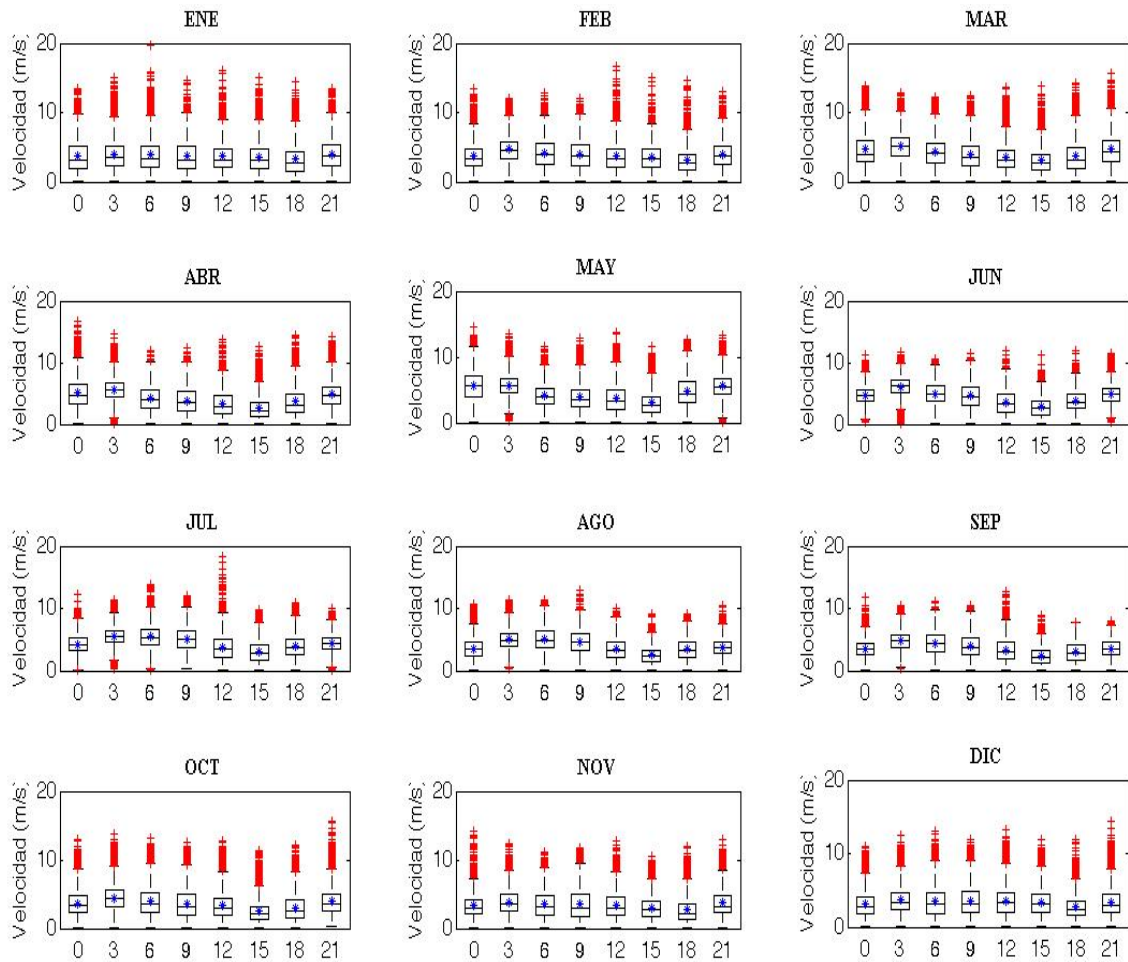


Figura 30. Distribución de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros horarios para la zona ZD6, 1979-2013. El asterisco dentro de la caja representa el valor promedio de la magnitud de la velocidad del viento en cada uno de los registros.

La ZD6 (Fig. 30) representa una zona espacialmente extensa por tal motivo posee una mayoría en cuanto a los datos analizados. Los meses en los que se registran los mayores valores para la magnitud de la velocidad del viento ($\approx 13 \text{ m s}^{-1}$) son: enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre y diciembre. Las horas preferenciales para tales valores corresponden a las 0:00, y de 12:00 a 21:00 horas.

4.4. Detección de polvo transportado por vía eólica

De acuerdo con las observaciones en la imagen del 22/10/2007 se realizó una revisión bibliográfica y se encontró que en esta fecha coexisten eventos de polvo e incendios producidos por efectos de los vientos Santa Ana reportados por la NASA y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

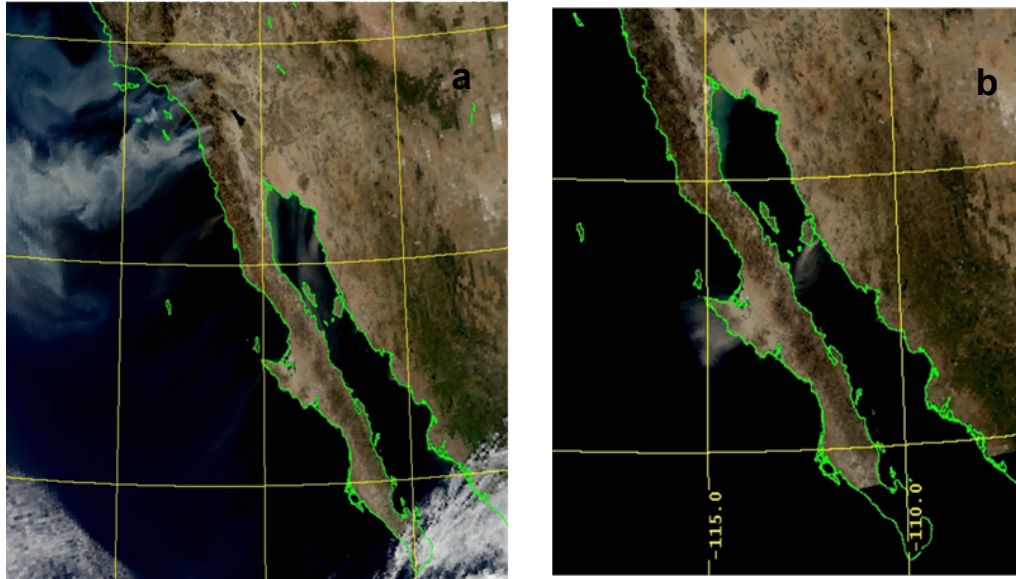


Figura 31. Imagen MODIS/AQUA, aparente presencia de polvo desde las zonas fuente hacia el GC.

Al utilizar las rutinas en Matlab desarrolladas por García-Álvarez (2014) para la detección de polvo en las imágenes MODIS (metodología propuesta por Miller, 2003) se obtuvo el siguiente resultado (Fig. 32):

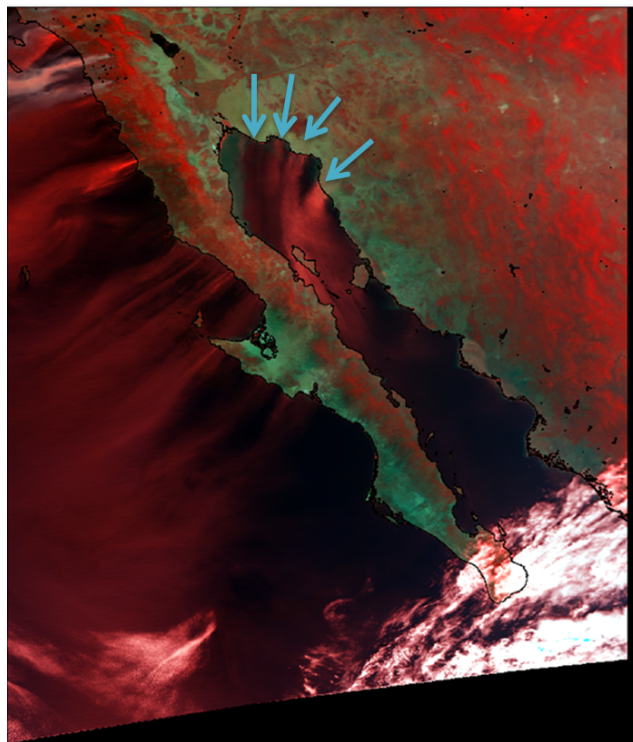


Figura 32. Detección de polvo en imágenes MODIS. Las zonas señaladas con la flecha azul muestran el origen de las plumas de polvo cuya dirección apunta hacia el GC (22/10/2007).

Se observa la existencia de plumas de polvo en donde se veía el humo de los incendios, se observa también la existencia de 4 plumas de polvo que cuyo origen se encuentran en las zonas ZD4 y ZD5.

Para la imagen del 27/11/2011 (Fig. 31b) se puede observar la existencia de eventos de polvo con plumas de origen en las zonas ZD1 y ZD6, al aplicarles las rutinas para la detección de polvo elaboradas por García-Álvarez (2014), se obtiene como resultado (Fig. 33) la existencia de una pluma de polvo que sale de la zona de estudio ZD6 con dirección hacia el Golfo de California, notándose su trayectoria y deposición.

Los resultados obtenidos se muestran congruencia con los hallados por García-Álvarez (2014) en la detección de aerosoles en imágenes MODIS para el noroeste de México.

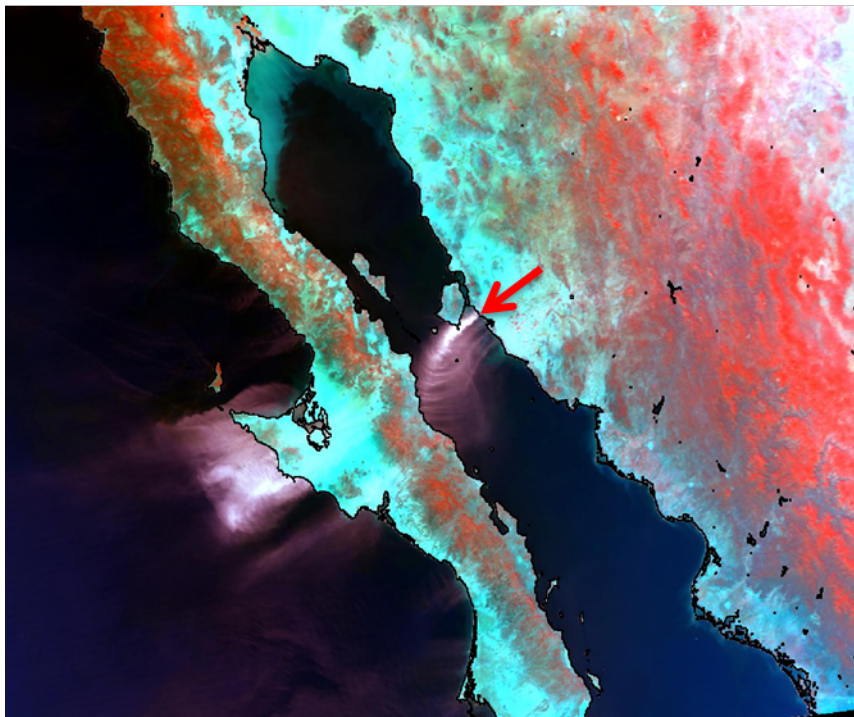


Figura 33. Detección de polvo en imágenes MODIS. La flecha roja señala el origen de una pluma de polvo que sale de la zona ZD6 (27/11/2011).

Una vez detectados los eventos de polvo en las imágenes MODIS, se verificó si su trayectoria es registrada con la resolución espacio-temporal de los datos NARR. Para ello se superpusieron los campos de viento en las imágenes procesadas.

Como resultado se obtuvo una representación visual de las zonas continentales del noroeste de México que representan la mayor probabilidad de ser zona fuente, la dirección del viento y la trayectoria que siguen las tormentas de polvo (Fig. 34).

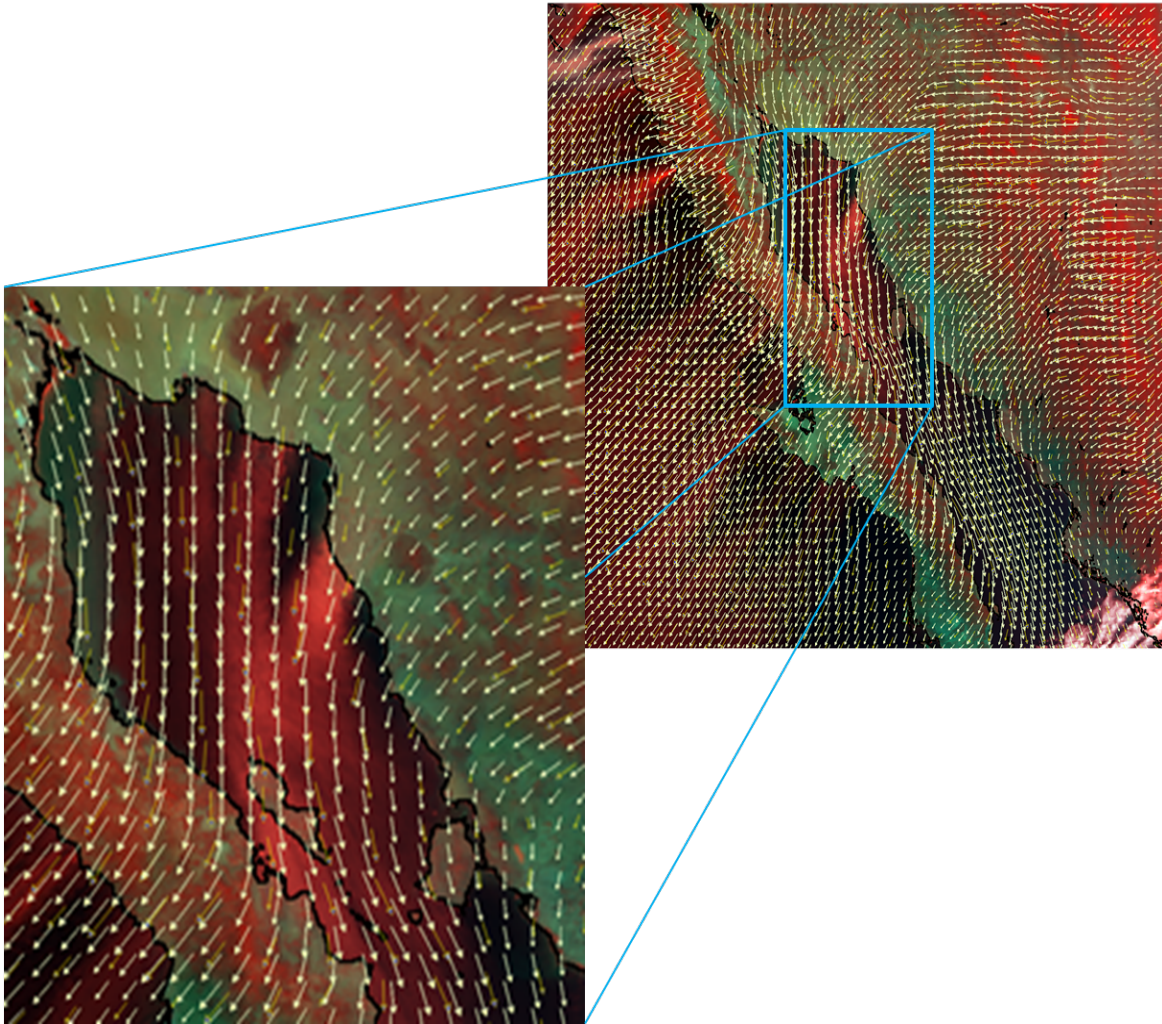


Figura 34. Superposición de campos de viento con la imagen MODIS del 22/10/2007 procesada para la detección de polvo.

Las Figuras 34 y 35 muestran el origen (desiertos arenosos), de las trayectorias de las tormentas de polvo, además de los campos de viento para las fechas en las que fueron captadas las imágenes satelitales. Se puede observar también en estas figuras que las direcciones que siguen los vectores de viento (en los recuadros ampliados) coinciden con las trayectorias de los eventos de polvo detectados en las imágenes MODIS.

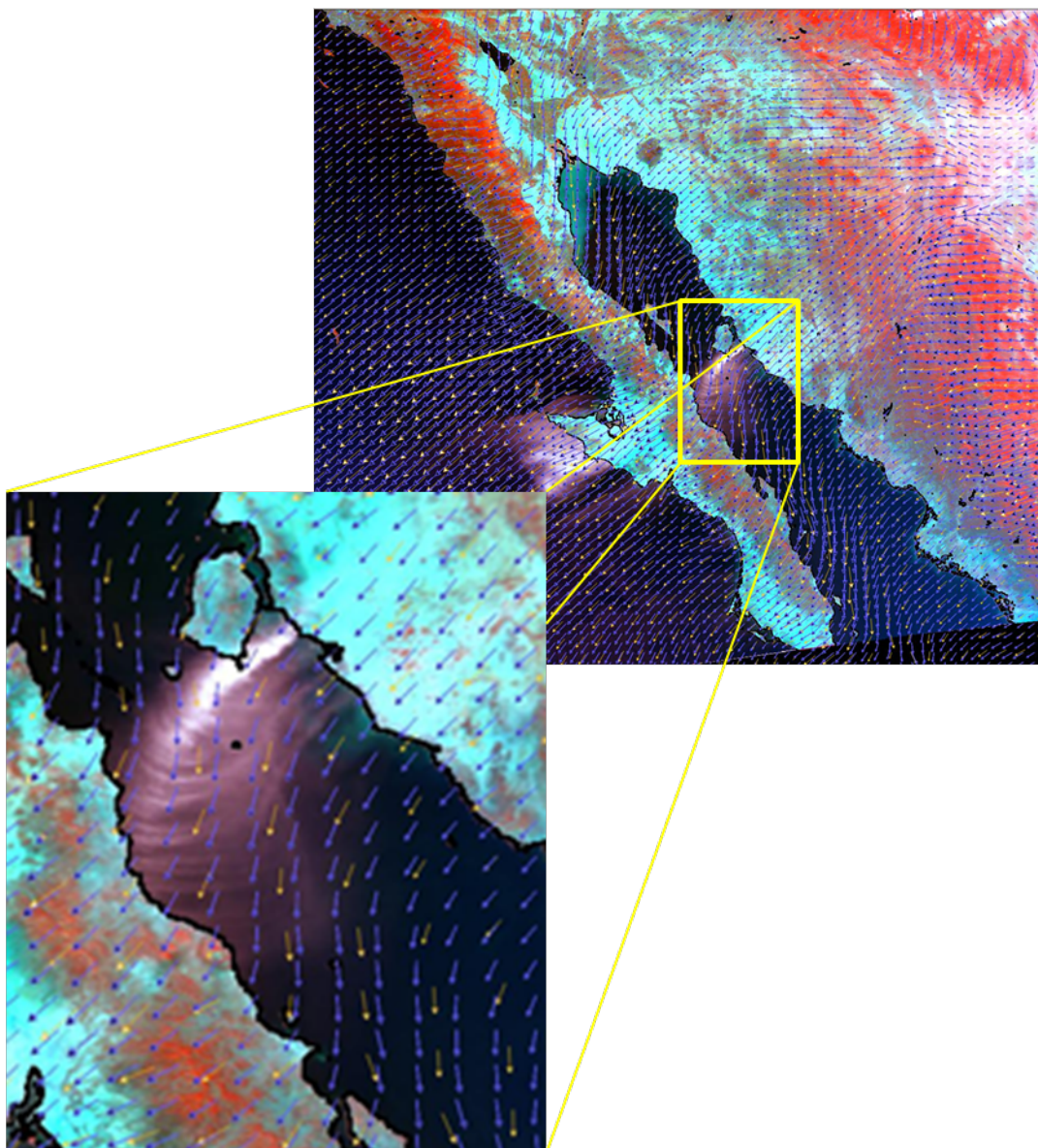


Figura 35. Superposición de campos de viento con la imagen MODIS del 27/11/2011 procesada para la detección de polvo.

4.5. Simulación del transporte de polvo con el modelo HYSPLIT

Se realizaron corridas del modelo HYSPLIT para el 22/10/2007 y el 27/11/2011 (Fig. 36 y 37). Para eventos de polvo se tiene que su ocurrencia tiene origen cuando el perfil del viento se encuentra justo en contacto con la superficie del suelo (desierto arenoso) por tal motivo la altura de arranque inició sobre la superficie terrestre ($h=0$ m). Se estimaron trayectorias hacia delante para identificar la dispersión de polvo mediante la selección del fichero de datos de viento del NARR en los periodos antes mencionados.

NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 1400 UTC 22 Oct 07
NARR Meteorological Data

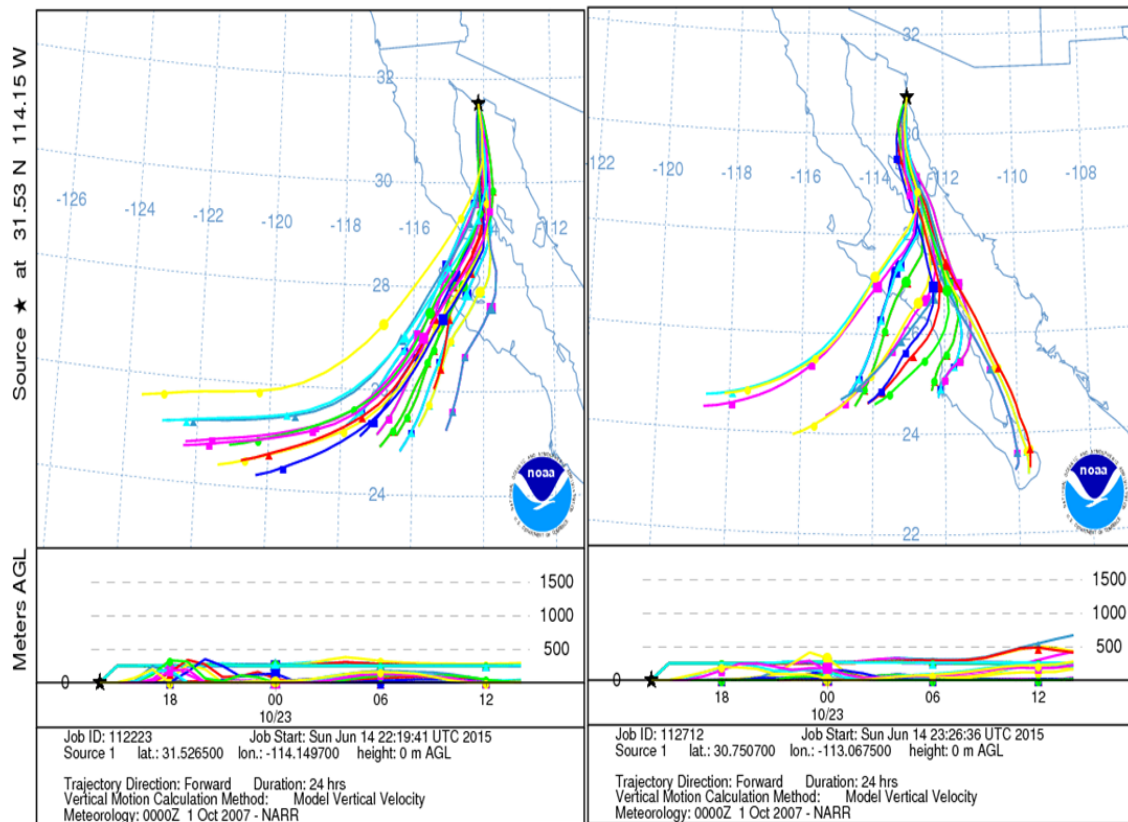


Figura 36. Trayectorias de eventos de polvo (líneas de colores) con el modelo HYSPLIT. Punto de partida para la trayectoria de la partícula en ZD5 (derecha) y ZD4 (izquierda) 22/10/2007.

Al ubicar el origen de la trayectoria en las zonas ZD4, ZD5 y ZD6 encontramos que las trayectorias modeladas no presentan recirculación por lo que podemos inferir que no se producirían altas concentraciones de polvo en la región de las trayectorias. Las alturas de las masas de aire varían durante la trayectoria con valores entre 0 y 500 m.

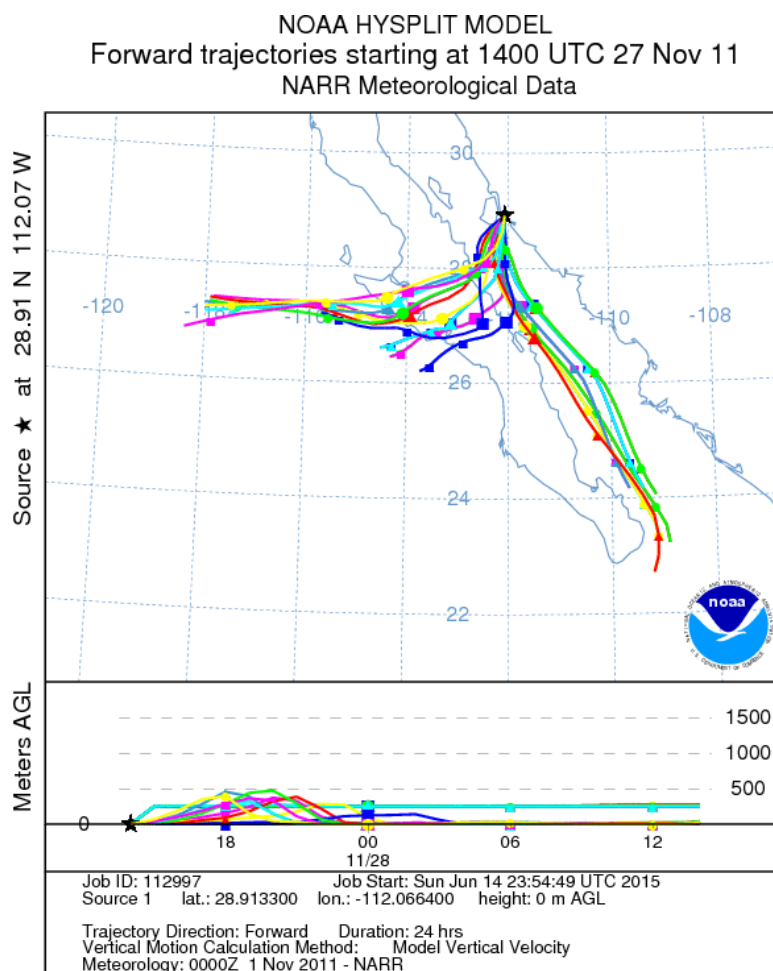


Figura 37. Trayectoria de eventos de polvo (líneas de colores) mediante la aplicación del modelo lagrangiano para la trayectoria de partículas HYSPLIT. Punto de partida de la trayectoria en ZD6. 27/11/ 2011.

4.6. Flujo promedio de polvo hacia el Golfo de California

A continuación se presentan los análisis de las muestras (masa en g) obtenidas en los 6 colectores (dos en cada ubicación) de partículas (Fig. 12) y el efecto que tienen los patrones de variabilidad espacio-temporal del viento en el flujo promedio de polvo en cada una de las zonas (Bahía de los Ángeles, San Felipe y Puerto Peñasco) en las que se realizó el muestreo y que son representativas para los flujos de polvo que provienen de las zonas ZD1, ZD2 & ZD3 y ZD4.

4.6.1. Análisis del flujo promedio de polvo en los colectores de partículas

Se obtuvo de los colectores de partículas ubicados en Bahía de los Ángeles, San Felipe y Puerto Peñasco para el año 2011, el promedio mensual de la masa (estandarizada 30 días) hallada en los dos colectores ubicados en cada estación.

Para la región de Bahía de los Ángeles (Tabla 7) el flujo promedio de polvo presenta valores aproximados entre ≈ 0.06 y $\approx 1.05 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ con mayores cantidades para los meses de junio, septiembre y noviembre (Fig. 38).

Tabla 7. Flujo promedio de polvo obtenido por el colector en la región de Bahía de los Ángeles durante el 2011.

Días Muestreados	Mes	Muestra (g)	Flujo Parcial ($\text{g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$)
24	01	0.000456	0.063
27	02	0.000572	0.066
28	03	0.000636	0.071
30	04	0.0007	0.073
28	05	0.0007	0.078
25	06	0.0026	0.328
22	07	0.0018	0.258
33	08	0.0011	0.105
30	09	0.01	1.052
30	10	0.0009	0.094
15	11	0.00195	0.410
73	12	0.003	0.129

Valores para el flujo promedio de polvo en San Felipe se muestran en la Tabla 8, estos oscilan de ≈ 0.10 hasta $\approx 1.22 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$, los valores máximos se encuentran en los meses de junio a octubre (Fig. 38).

Tabla 8. Flujo promedio de polvo obtenido por el colector en la región de San Felipe durante el 2011.

Días Muestreados	Mes	Muestra (g)	Flujo Parcial ($\text{g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$)
31	01	0.0024	0.244
28	02	0.0011	0.124
31	03	0.0015	0.152
30	04	0.00125	0.131
31	05	0.0018	0.183
31	06	0.0069	0.702
31	07	0.012	1.222
28	08	0.0095	1.071
31	09	0.0109	1.112
31	10	0.006	0.611
31	11	0.0011	0.112
33	12	0.0011	0.105

La región de Puerto Peñasco (Tabla 9) presenta valores desde ≈ 0.14 a $2.6 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$. Los valores máximos para los flujos promedios de polvo se encontraron en los meses de noviembre y diciembre (Fig. 38).

Tabla 9. Flujo promedio de polvo obtenido por el colector en la región de Puerto Peñasco durante el 2011.

Días	Mes	Muestra (g)	Flujo Parcial ($\text{g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$)
30	01	0.0017	0.178
28	02	0.0023	0.259
31	03	0.0021	0.213
30	04	0.0013	0.136
29	05	0.0015	0.163
28	06	0.00542	0.611
27	07	0.00738	0.864
27	08	0.00935	1.093
25	09	0.0083	1.048
31	10	0.00765	0.779
23	11	0.019	2.608
27	12	0.0133	1.693

Delgadillo-Hinojosa et al. (2006) y Segovia-Zavala et al. (2009), indican mayor flujo de partículas atmosféricas totales durante verano-otoño ($>65 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), y menor flujo para la primavera ($<40 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) para la región central del GC para el periodo de Octubre de 1997 a agosto de 1998. El Niño reportado en esa fecha indico aumentos de aproximadamente cuatro veces en la intensidad del viento sin cambiar su dirección, para la región central y norte del GC durante 1998 en comparación con el 2003 (Segovia-Zavala et al., 2009).

Nuestros resultados muestran mayores flujos durante el verano-otoño ($>0.32 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$) y menores durante invierno-primavera ($<0.17 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$) para las regiones de San Felipe y Bahía de Los Ángeles, a su vez para Puerto Peñasco se tiene flujos máximos durante verano-otoño ($>0.61 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$) y mínimos durante invierno-primavera ($<0.25 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$).

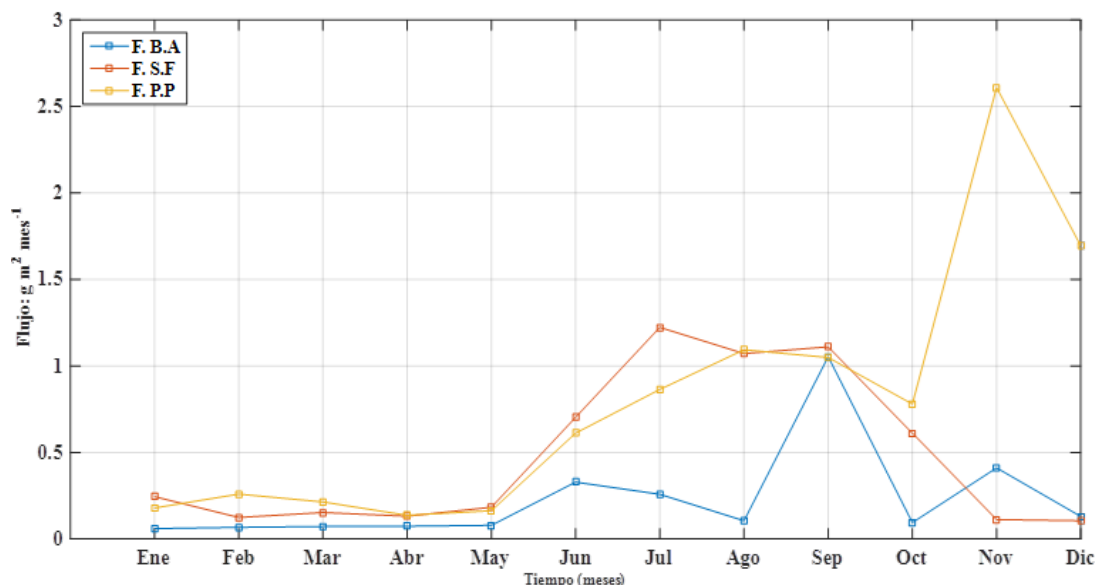


Figura 38. Flujo promedio de polvo registrado en los colectores para el año 2011 en la región norte y central del GC. Puerto Peñasco (línea amarilla), San Felipe (línea roja) y Bahía de los Ángeles (línea azul).

4.6.2. Variabilidad espacio-temporal del viento y su efecto en el flujo promedio de polvo para el 2011

Resultados obtenidos en la región de Bahía de los Ángeles (Fig. 39) permiten afirmar que el viento que se dirige hacia el GC se presenta para los meses de enero a mayo y de octubre a diciembre. En septiembre (Fig. 39) se presenta el máximo flujo promedio de polvo registrado en los colectores, pero no corresponde a la dirección predominante de los vientos hacia el GC pero si hacia la península. El mes de noviembre (Fig. 39) presenta un valor significativamente alto ($1.052 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$) para el flujo promedio de polvo registrado en los colectores, la dirección predominante del viento y la ubicación de las zonas identificadas como desiertos arenosos (para este caso particular ZD1) durante esa época favorece tales resultados.

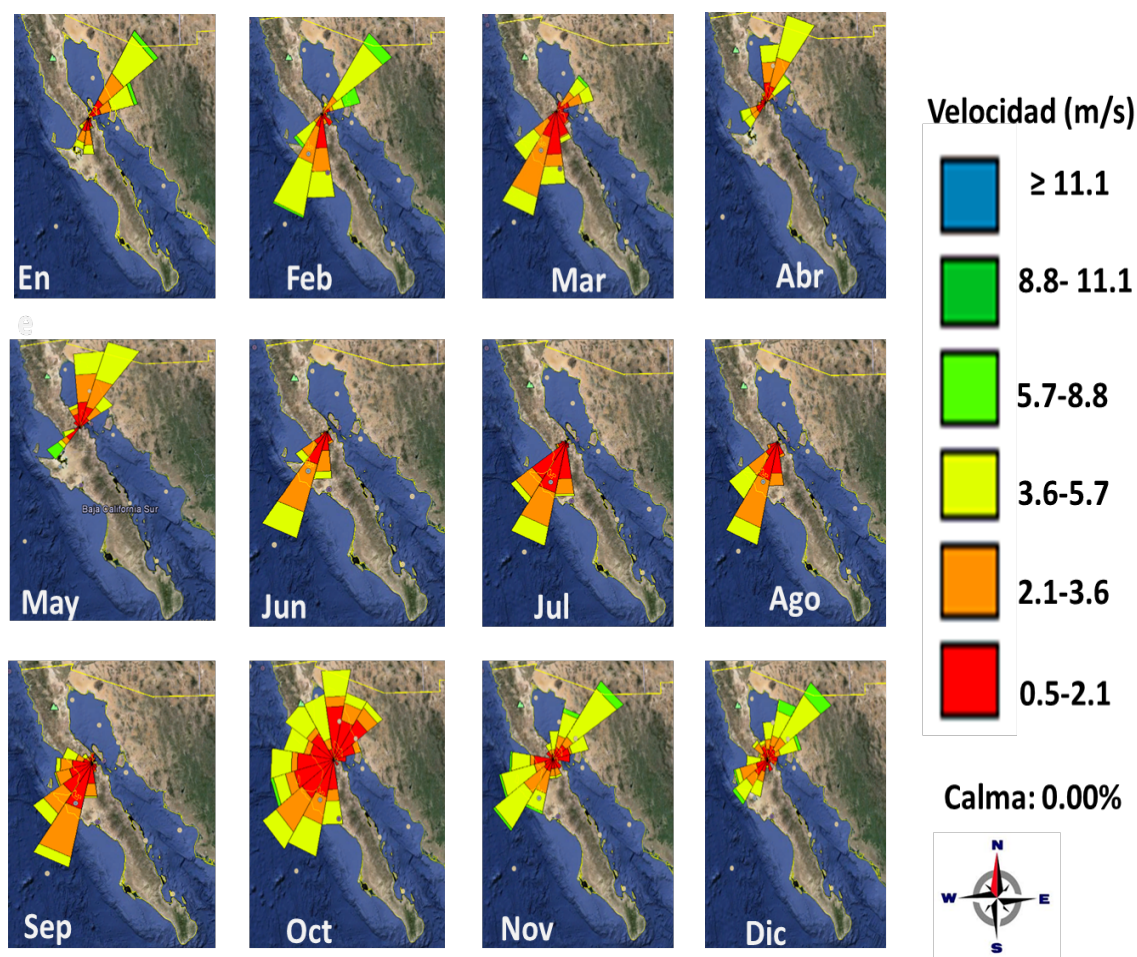


Figura 39. Rosas de viento, generadas con datos NARR cuya resolución espacial es de 32 km y temporal de 8 registros diarios. La convención hacia donde sopla el viento en la región de Bahía de Los Ángeles para el año 2011.

Para la región de San Felipe (Fig. 40) el análisis de la variabilidad espacio-temporal del viento muestra durante todo el año direcciones del viento hacia el GC. Los meses en los que predomina este suceso son de enero a mayo y de octubre a diciembre, representando a su vez flujos promedios de polvo de 0.82 y 0.83 $\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$ respectivamente (Tabla 8). La dirección predominante del viento para el mes de julio es hacia la península y se encontró que para éste mes que el valor registrado en el colector representa la máxima cantidad (1.22 $\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$).

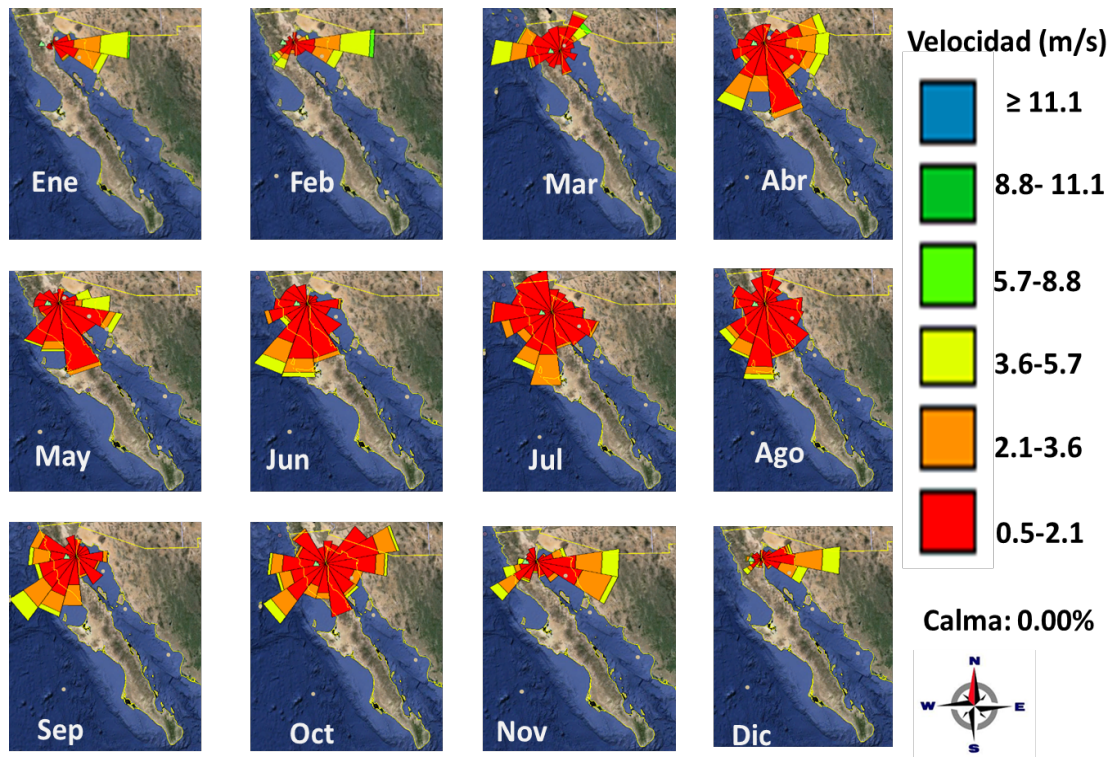


Figura 40. Rosas de viento, generadas con datos NARR cuya resolución espacial es de 32 km y temporal de 8 registros diarios. La convención hacia donde sopla el viento en la región de San Felipe para el 2011.

El análisis de la variabilidad espacio-temporal del viento en la región de Puerto Peñasco (Fig. 40) muestra direcciones del viento hacia el GC durante todo el año, con menor predominancia en el mes de octubre. El mes de noviembre presenta el máximo aporte de polvo cuantificado en el colector ($2.6 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$), y se observa que la predominancia de la dirección del viento es hacia la parte norte del GC (delta del Rio Colorado y el alto Golfo). Para el mes de diciembre se dan eventos en los que la dirección del viento obedece al patrón estacional descrito en la literatura expuesta anteriormente (noroeste-sureste), indicando un aporte de polvo significativo equivalente a $1.69 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ en la cabecera del GC.

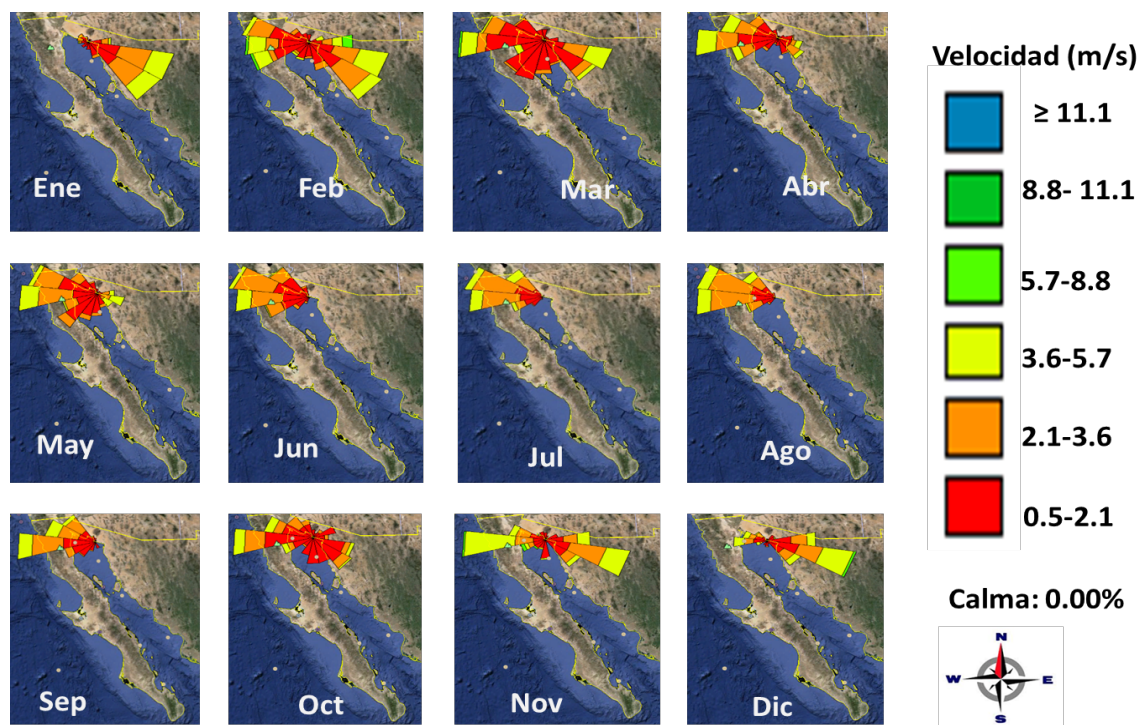


Figura 41. Rosas de viento, generadas con datos NARR cuya resolución espacial es de 32 km y temporal de 8 registros diarios. La convención hacia donde sopla el viento en la región de Puerto Peñasco para el 2011.

4.6.3. Análisis de la dirección del viento y el flujo promedio de polvo

Cada una de las zonas que son potencialmente fuente de polvo dentro del noroeste de México se deben cumplir la condición de dirección del viento mostradas en la Tabla. 10, para que el aporte de material terrígeno ocurra hacia el GC. Los resultados del análisis de la dirección del viento y del flujo promedio de polvo se muestran a continuación.

Tabla 10. Direcciones que permiten el transporte de polvo hacia el GC desde cada una de las zonas en las que se encuentran los colectores.

ZONAS	ÁNGULO
B. Ángeles	$0^{\circ} \leq \theta \leq 175^{\circ}$
S. Felipe	$10^{\circ} \leq \theta \leq 175^{\circ}$
P. Peñasco	$90^{\circ} \leq \theta \leq 270^{\circ}$

Bahía de los Ángeles es una región que por su ubicación geográfica se encuentra próxima a recibir aportes de polvo que provienen de la zona ZD1, la Figura. 41 permite afirmar que en los meses de enero a abril y diciembre el flujo promedio de polvo que recibe el GC es de $\approx 0.402 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$.

En la región de San Felipe (Fig. 42) la resultante de la dirección del viento y su relación con el flujo promedio de polvo hallado en los colectores permite visualizar que en los meses de enero a mayo y octubre a diciembre el GC recibe un aporte promedio de polvo de $\approx 1.66 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$.

Para la región de Puerto Peñasco la resultante de la dirección de la velocidad del viento (Fig. 42) nos muestra que los meses en los que se da aporte de polvo hacia el GC son de enero a mayo y de octubre a diciembre con una cantidad de $\approx 6.02 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$.

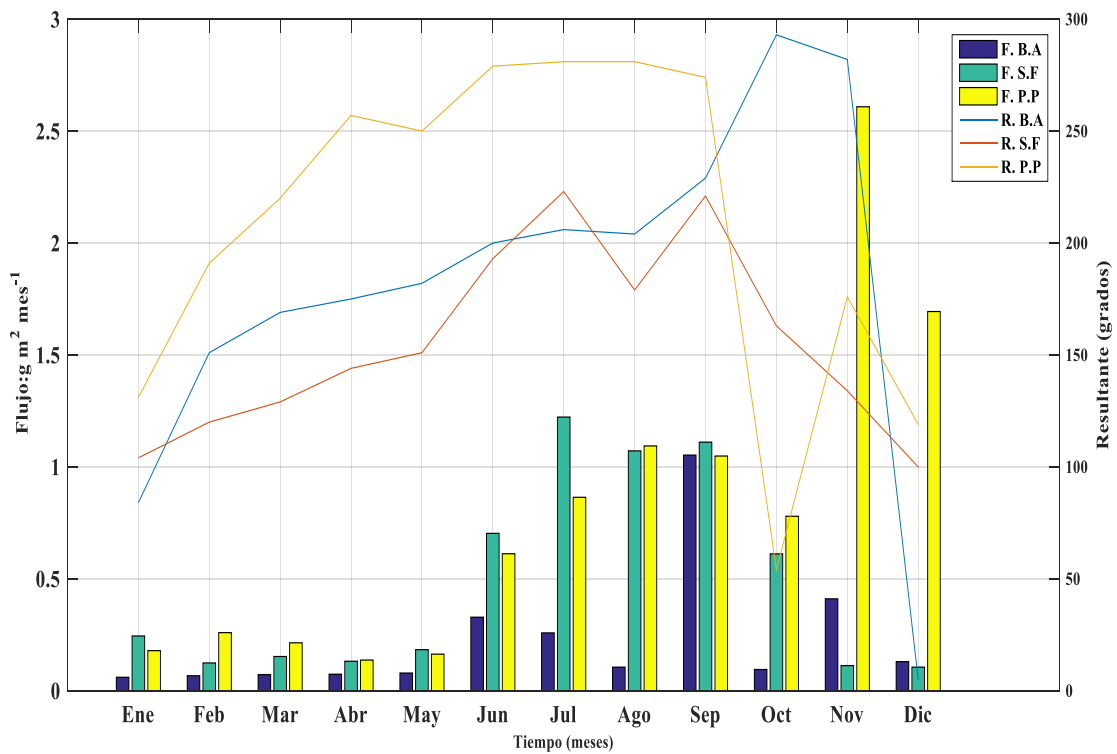


Figura 42. Resultante de la dirección del viento Bahía de Los Ángeles (línea azul). Resultante de la dirección del viento San Felipe (línea roja). Resultante de la dirección del viento Puerto Peñasco (línea amarilla). Flujo promedio de polvo para Bahía de Los Ángeles (barras azules). Flujo promedio de polvo para San Felipe (barras verdes).). Flujo promedio de polvo para Puerto Peñasco (barras amarillas). Periodo de estudio 2011.

4.7. Modelo conceptual

El transporte eólico de polvo hacia el GC puede ser definido como un proceso en el que una función (Γ) depende de cuatro variables: La erosión eólica del terreno (ξ), la circulación atmosférica en la superficie terrestre (C), la trayectoria de la partícula en la atmosfera (τ) y la sedimentación (S), se tiene que:

$$\Gamma = \Gamma (\xi, C, \tau, S)$$

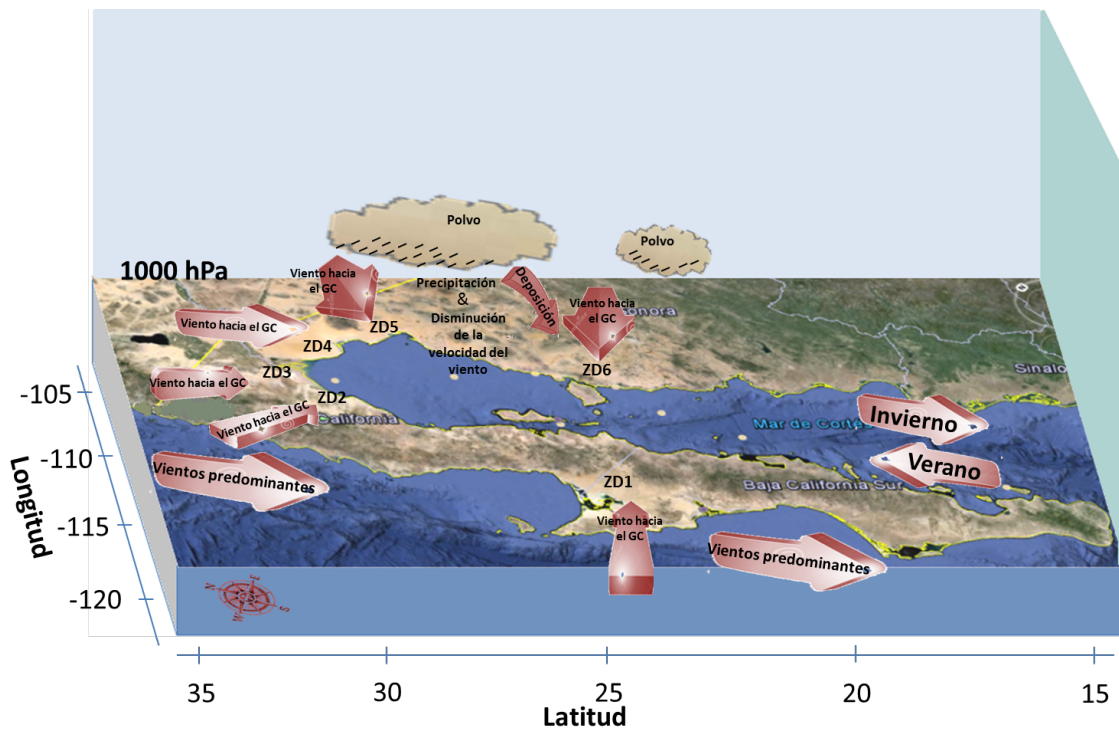


Figura 43. Modelo conceptual para el transporte polvo hacia el GC (elaborado a partir de google Earth). Se representa el transporte eólico de polvo hacia el GC como función de la erosión eólica (ξ) de cada una de las zonas desérticas identificadas en el Noroeste de México (ZD1 a ZD6), la circulación atmosférica en la superficie terrestre (C) representada por los patrones de la variabilidad espacio-temporal del viento (Flechas rojas), la trayectoria de la partícula en la atmosfera (τ) representada por la nube de polvo ubicada sobre el GC y la sedimentación (S) descrita con dos procesos (precipitación y disminución de la velocidad del viento).

4.7.1. Erosión eólica en los desiertos arenosos (ξ)

El noroeste de México cuenta con seis zonas desiertos arenosos (Fig. 43) que actúan como fuente de polvo para todo el noroeste de la república.

Las partículas de polvo son puestas en movimiento mediante la deflación y según su tamaño pueden ser transportadas varios cientos de kilómetros de distancias verticales y horizontales hasta encontrar condiciones ambientales y

climáticas adecuadas para su depósito y sedimentación (Martínez-Avellaneda, 2010).

Resultados obtenidos en este trabajo muestran a detalle una cantidad estimada de polvo que es transportado por vía eólica hacia el GC durante el año 2011 equivalente a $8.082 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, para seis colectores de partículas cuyas ubicaciones representan sitios ubicados según la metodología descrita por Segovia-Zavala et al. (2009) (Fig. 16), y donde se espera deban circular y sedimentarse eólicamente partículas de polvo provenientes de las zonas desérticas que actúan como fuente de polvo.

Los resultados obtenidos en el apartado 4.6 permiten afirmar que el flujo eólico de polvo proveniente de la península de Baja California (ZD1 a ZD3) presenta un comportamiento estacional con preferencia en épocas invierno, primavera, inicios de verano y finales de otoño, mientras que la región norte del GC (ZD4 y ZD5) el flujo eólico de polvo se presenta a finales de otoño y durante el invierno.

4.7.2. Circulación de los vientos desde la superficie terrestre hasta una altura de 1000 hPa (C)

Las características topográficas propias a la superficie terrestre influyen térmica y geoméricamente en el calentamiento de la tierra, del aire que la rodea y del flujo que circula a través de ella. El flujo de aire que está cercano a la superficie terrestre da origen a las turbulencias térmicas o mecánicas (Wallace & Hobbs, 2006). Para el noroeste de la república se identificaron patrones estacionales (invierno y verano) de la dirección del viento dentro del GC (noreste-suroeste y suroeste-noreste) y direcciones del viento que predominan en la región continental y en la península para las estaciones de:

Otoño-invierno:

- noroeste-sureste en la península
- noreste-suroeste en las zonas ZD2, ZD3 y ZD4
- en la zona ZD5 el viento que provienen del norte y del noroeste al entrar a la región marina perteneciente al GC cambian su dirección

obedeciendo a los patrones estacionales expuestos en la bibliografía para el invierno

- para la región ZD6 provienen vientos del noroeste y al llegar a la costa su dirección cambia y llegan a ser paralelos a ella

Primavera-verano:

- este-oeste para la península
- sur-norte para la región ZD4
- sureste-noroeste para la región ZD5

Los registros de tiempo que durante el día representan condiciones propicias para la erosión y transporte eólico corresponden al intervalo 3:00 a 15:00 horas, con máxima frecuencia a las 9:00 y 12:00 horas.

Las regiones ZD2 y ZD3 presentan condiciones de intensidad de viento que propician la erosión y el transporte eólico de polvo durante el otoño preferencialmente entre 9:00 y 15:00 horas y a inicios de primavera (con preferencia en 0:00, 3:00 y 12:00 horas).

La región de estudio que presenta el mayor porcentaje de condiciones de viento (intensidad y dirección) que propician la erosión y transporte eólico de polvo hacia el GC es la ZD4 con un porcentaje $\approx 48.8\%$ (ver apartado 4.2 y 4.3).

4.7.3. Trayectoria de eventos de polvo (τ)

Una partícula de polvo que es desprendida desde la superficie terrestre de cada uno de los desiertos arenosos bajo la acción del viento recorre distancias horizontales y verticales para luego depositarse en distintos ambientes (océanos, mares, golfos, continentes, entre otros).

El modelo lagrangiano empleado para simular la trayectoria de partículas de polvo (ver sección 4.4) desde las zonas fuente ZD4 a ZD6 en las que se detectaron las plumas de polvo mediante la aplicación del algoritmo para la detección de polvo en imágenes MODIS desarrollado por García-Álvarez (2014), permitió observar y verificar que los eventos de polvo dependen de la dirección y la intensidad del viento además que estos alcanzan alturas de hasta

aproximadamente 500 m de la superficie terrestre logrando su depósito comúnmente en el GC y en el océano Pacífico.

4.7.4. Sedimentación de polvo en el Golfo de California (S)

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran [mediante la utilización del modelo HYSPLIT, la aplicación del algoritmo para la detección de polvo expuesto por Miller (2003), el estudio de los patrones espaciotemporales del viento y la relación de las muestras obtenidas en los colectores de partículas con los patrones espacio-temporales del viento en cada una de las tres zonas particularmente seleccionadas] que el polvo de las zonas fuente (ZD1 a ZD6) obedeciendo la dirección e intensidad del viento se sedimenta en el GC de la siguiente manera: Durante el otoño-invierno desde las zonas ZD2, ZD3, ZD4, ZD5 Y ZD6, y para primavera-verano desde ZD1, ZD2 y ZD3. Con horas preferenciales entre 3:00 y 15:00 horas, con máxima frecuencia a las 9:00 y 12:00 horas.

5. CONCLUSIONES

- En la zona continental del noroeste de México existen seis zonas desérticas (ZD1 a ZD6) ubicadas alrededor del Golfo de California cuyas características geográficas (zonas áridas), vegetación predominante (matorral desértico microfilo, matorral desértico rosetofo, vegetación de desiertos arenosos) y unidad de suelo (arenosol) nos permiten definirlas como zonas de desiertos arenosos que tienen una alta probabilidad de actuar como fuente de polvo.
- El comportamiento estacional en cuanto a la dirección del viento para invierno (noreste-suroeste) y el verano (suroeste-noreste) ocurre únicamente en la región del GC y las regiones costeras continentales y peninsulares.
- Para la región continental y la península se observó un factor común en cuanto a la dirección del viento. Durante el otoño-invierno en la península predominan vientos direccionados desde noroeste-sureste, para las regiones ZD2, ZD3 y ZD4 viento con dirección noreste-suroeste y para la región ZD6 provienen vientos del noroeste y al llegar a la costa

la dirección se torna paralela a ella. Durante primavera-verano predominan en la península vientos con dirección este-oeste, para la región ZD4 vientos con dirección sur-norte y en ZD5 predomina la dirección sureste-noroeste.

- Las horas del día en que la magnitud de la velocidad del viento permite la erosión eólica es de 3:00 a 15:00 horas, con valores máximos de 9:00 a 12:00 horas del día.

Los datos atípicos tienen velocidades del viento entre 10 y 20 m s⁻¹ condiciones idóneas que indican la existencia de tormentas de polvo.

- ZD4 es la zona con mayor porcentaje (≈48.8 %) de condiciones de viento (dirección e intensidad) que favorecen el transporte de polvo hacia el GC.
- La detección de eventos de polvo en las imágenes MODIS permitió ubicar el origen de plumas en las zonas desérticas arenosas antes identificadas.
- Las trayectorias que siguen los eventos de polvo desde la zona de origen hasta su depósito en la región central y norte del GC, obedecen a las condiciones del terreno y a la variabilidad de la intensidad y dirección de la velocidad del viento.
- El flujo total de polvo colectado en las tres zonas de muestreo de polvo (Bahía de los Ángeles, San Felipe y Puerto Peñasco) y cuya dirección fue hacia el GC durante el año 2011 es de 8.082 g m⁻² yr⁻¹

6. RECOMENDACIONES

- En este trabajo se obtuvo (mediante la utilización de cartografía temática del INEGI, SIAP y CONABIO) las zonas de desiertos arenosos que actúan como fuente de polvo en el noroeste de México. Se recomienda obtener características granulométricas y la rugosidad de los suelos que componen estas regiones de desiertos arenosos, para calcular relaciones con el perfil logarítmico del viento e identificar la erosión potencial eólica. Ubicar colectores de partículas transportadas por el

viento dentro de estas zonas brindaría información sobre el volumen de polvo que es levantado y transportado hacia el GC.

- Los datos de viento del modelo NARR subestiman el comportamiento del viento en la península por su resolución espacial (32 km) y temporal (3 h) muchos fenómenos de escala local como las brisas marinas, circulaciones valle montaña y el fenómeno de las ráfagas de viento no se alcanzan a percibir, por lo que se sugiere realizar un estudio a detalle con datos cuya resolución espacial permitan la descripción de tales fenómenos.
- Con el algoritmo para la detección de polvo de Miller (2003), se identificaron plumas de polvo, su origen en las zonas fuente y su trayectoria. Se sugiere implementar un algoritmo para la detección que nos estime la concentración de polvo a partir de imágenes satelitales (ej. Allende et al., 2012).
- En este trabajo se obtuvo el flujo total de polvo durante el 2011 y se identificó variación estacional del depósito de polvo. Se recomienda tener colectores distribuidos alrededor del GC, ubicado en cercanías de las 6 zonas desérticas y con una arquitectura que permita captar únicamente el flujo de polvo que se dirige hacia el GC.
- Se recomienda identificar la influencia de ENSO en los patrones de variabilidad espacio-temporal del viento y el flujo de polvo.

7. REFERENCIAS

- Álvarez-Castañeda, S. T., Salinas-Zavala, C. A., & De Lachica, F., 1995. Análisis biogeográfico del noroeste de México con énfasis en la variación climática y mastozoológica. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, 66, 59-86.
- Allende, D., Mulena, C., Cremades, P., & Puliafito, E., 2012. Transporte de aerosoles generados por erosión durante episodios de fuertes vientos: Un estudio de modelado. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 16, 15-21.
- Arreola-Contreras, J. L., & González, G., 1999. Análisis espectral del viento y partículas menores de 10 micrómetros (PM10) en el área metropolitana de Monterrey, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15(2), 95-102.
- Badan-Dangon, A., Dorman, C. E., Merrifield, M. A. & Winant, C. D., 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, 96, 16,877– 16,896.
- Baddock, M. C., Bullard, J. E., & Bryant, R. G., 2009. Dust source identification using MODIS: A comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1511-1528.
- Bagnold, R.A., 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. (New York: Methuen). 167 0282-91
- Baptista-Rojas, R. C., & Riquelme-Pérez, M., 2009. Resumen del Clima en La Frontera. <http://www.ispe.arizona.edu/climas/forecasts.html>.
- Bray N., Robles, J. M., 1991. Physical oceanography of the Gulf of California. In: Dauphin JP, Simoneit BR (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists Mem. 47, 511–553.
- Buschiazzo, D. E., & Aimar, S. B., 2003. *Erosión Eólica: Procesos y Predicción*, Cap. 2. Viento, Suelo y Plantas. INTA Editores, 67, 160p.

- Castro, R., & Martínez, A., 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. En: Gaxiola-Castro, G., & Durazo, R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. 129-147.
- Cañellas-Jalon, M., 2011. Improved near real time Surface wind resolution over the Mediterranean Sea. *Ocean Science*, 3, 259-271.
- CONABIO., 2010. División Política Estatal, Unidades de Suelo de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, Distrito Federal, México. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx>.
- Chávez, Á. A. D., López, H. E. F., De la Mora-Orozco, C., Corral, J. A. R., Ojeda, R.G., & Camacho, E. R., 2014. Sensibilidad de zonas bioclimáticas de México frente al cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, (10), 2021-2033.
- Chepil, W.S., 1945. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Sci.* 60:305-332.
- Chervin, R. M., 1980. On the simulation of climate and climate change with general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(9), 1903-1913.
- Chervin, R. M., 1981. On the comparison of observed and GCM simulated climate ensembles. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(5), 885-901.
- Delgadillo-Hinojosa, F., 2000. Biogeoquímica del cadmio y manganeso en el Golfo de California. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 181 p.
- Davenport, A. G., 1960. 'Rationale for Determining Design Wind Velocities', *J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Engin.* 86, 39–68.
- Delgadillo-Hinojosa, F., Segovia-Zavala, J. A., Huerta-Díaz, M. A., Atilano-Silva, H., 2006. Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in Gulf of California waters. *Deep-Sea*

- Res. I 53: 1301–131 Díaz-Rodríguez, G., 2008. Estudio de la distribución vertical de manganeso y cobalto en la región de las grandes islas del Golfo de California. M.Sc. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 91 p.
- Domínguez-Rosas, A., 2008. Distribución vertical y temporal de níquel y cadmio en el Golfo de California. M.Sc. tesis, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 97 p.
- Douglas, MW., Maddox, R.W., Howard, K., Reyes, S., 1993. The Mexican Monsoon. J. Clim. 6: 1665–1677.
- Dzul, F., & Manzanillo-Domínguez, H., 2005. Los Huracanes: Su Impacto en la Península de Yucatán en los Últimos 100 años. Colegio de la Frontera sur, Unidad Chetumal, 20p.
- Environmental Protection Agency (EPA)., 2006. Industrial wind erosion. Documento en Línea. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508001092>
- Estellés Leal, V., 2006. Caracterización de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante fotometría solar. Servei de Publicacions, Universitat de Valencia, 260 p.
- Estrada Porrúa, M., 2001. Cambio Climático Global: Causas y Consecuencias. Revista de información y análisis.16: 1-17 pp.
- Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rutllant, J., & Le Roux, J. P., 2009. Estacionalidad de la erosión y el transporte eólico de partículas en el desierto costero de Atacama, Chile (23° S). Andean Geology, 36(2), 288-310.
- García- Álvarez. Y., 2014. Procesamiento de imágenes para la teledetección de aerosoles en el noroeste de México, MSc Tesis, Instituto Tecnológico de La Paz, 104p
- García-Escobar, H., 1985. Estudio de patrón de vientos en 5 estaciones meteorológicas del Noroeste de México.

- García-Mora, T., Mas, J.F., 2011. Presentación del sensor MODIS. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Primera edición, 109p.
- García, O. E., Díaz, A. M., Guirado, C., Barrancos, J., Díaz, J. P., Expósito, F. J., & Guerra, J. C., 2005. Evaluación del Índice de Aerosoles AI-TOMS a partir de parámetros de aerosoles derivados de MODIS. XI Congreso Nacional de Teledetección, 21-23 septiembre 2005. Puerto de La Cruz. Tenerife. 367-370.
- Geiger, R., 1961. The Climate near the ground. Friedrich Vieweg & Son. Brunswick, Germany. Third Printing, 1971, USA. 642p.
- Ginoux, P., Prospero, J.M., Torres, O., Chin, M., 2004. Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation. Environ. Model. Softw. 19, 113–128.
- González, A., Charlotte, E., Garcillán, P., & Ezcurra, E., 2010. Ecorregiones de la península de Baja California: Una síntesis. Boletín de la Sociedad Botánica de México, (87), 69-82.
- González, O. E. D., Torres, F. J. O., & Castillo, S. L., 1994. Las brisas durante algunos meses de primavera y verano en el noroeste del Golfo de California. Ciencias Marinas, 20, 421-440.
- Guevara, J. M. D., 2013. Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. Terra Nueva Etapa, 29(46), 81-101.
- Hinds, W. C., 2012. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons. 504 p.
- INEGI., 2010. Uso de Suelo y Vegetación. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, Distrito Federal, México. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, M., Tignor, S., Allen, K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M., (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Iversen, J. D., Pollack, J. B., Greeley, R., & White, B. R., 1976. Saltation threshold on Mars: The effect of interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density. *Icarus*, 29(3), 381-393.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., & Torres, R., 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308(5718), 67-71.
- Jiménez, A., Marinone, S. G., & Parés-Sierra, A., 2005. Effect of the spatial and temporal variability of winds on the circulation in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*. 31(2), 357-368
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O., 2002. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223.
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C., 2008. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM. ISBN: 978-968-817-887-4. 106 pp.
- Lavín, M. F., Beier, E., & Badan, A., 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía, 3, 141-171.
- Mahowald, N. M., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Duce, R. A., Jickells, T. D., & Tegen, I., 2005. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4).
- Marinone, S.G., 2003. A three dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*108 (C10), 3325, doi: 10.1029/2002 JC 001720.

- Martínez Avellaneda, N., 2010. The impact of Saharan dust on the North Atlantic circulation, PhD Thesis, Universität Hamburg.101p.
- Martínez-Flores, G., Segovia-Zavala, J. A., & García-Álvarez, Y., 2013. Variabilidad espacio-temporal de la circulación atmosférica en el Noroeste de México. XX congreso nacional de ciencia y tecnología del mar. Cabo San Lucas, Baja California Sur, 1 al 4 de octubre. 16p.
- Mas, J. F., 2011. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Primera edición. 978-607
- Mesa, O. J., Poveda, G., & Carvajal, L. F., 1997. Introducción al Clima de Colombia. Imprenta Universidad Nacional de Colombia, Santafé De Bogotá, Colombia. 390p.
- Michalakes, J. J., Dudhia, D., Gill, T., Henderson, J., Klemp, W., Skamarock., & Wang, W., 2004. The Weather Reseach and Forecast Model: Software Architecture and Performance. 11th Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology, Reading, United Kingdom, European Centre for Medium Range Weather Forecasts.156-168 p.
- Miller, S.D., 2003. A Consolidated Technique for Enhancing Desert Dust Storms with MODIS. Geophys. Res. Lett. 30: 2071, doi: 10.1029/2003GL018279.
- Miller, R.L., Tegen, I., & Perlwitz, J., 2004. Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. J. Geophys. Res. 109 (D4), D04203.
- Monin, A., & Obukhov, A., 1954. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. Trud. Geofiz. Inst. Akad. Nauk. SSSR, No. 24, 151, pp. 163–187. Traducción del Ruso en 1959, por American Meteorological Society y disponible en Defense Technical Information Center. Disponible en: <<http://handle.dtic.mil/100.2/AD672723>>
- Moragues, J., & Rapallini, A., 2003. Energía eólica. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”. 22p.

- Mulena, C., Allende, D., Puliafito, E., & Lakkis, G., 2012. Estudio de la Dispersión de Cenizas Volcánicas del Puyehue: Simulaciones y Validación. *Av. Energías Renov. Medio Ambiente*, 16, 7-14.
- Orozco-Contreras, J., 2014. Contribución del régimen de brisas en el potencial eoloelectrico de la zona costera de Tamaulipas. (Doctoral dissertation), 59p.
- Parés-Sierra, A., Mascarenhas, A., Marinone, S. G., & Castro, R., 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1312.
- Prohom-Duran, M. J., 1998. Principales características de la brisa marina estival en un punto de la costa catalana: Sant Pere Pescador. VIII Coloquio del Grupo de Métodos Cuantitativos de Información Geográfica y Teledetección. *AGE*, 167-179.
- Pye, K., & Tsoar, H., 1987. The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts, with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in the northern Negev, Israel. In I. Reid and L. Frostick (eds.) *Desert Sediments Ancient and Modern*. Blackwell, Oxford (in press).
- Portman, D., Wang, W., & Karl, T., 1992. Comparison of general circulation model and observed regional climates: daily and seasonal variability. *J. of Climate* 5:343-353.
- Prospero, J. M., Charlson, R. J., Mohnen, V., Jaenicke, R., Delany, A. C., Moyers, J., Zoller, W., & Rahn, K., 1983. The atmospheric aerosol system: an overview. *Rev. Geophys. Space Phys.* 21, 1607-1629.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of geophysics*, 40(1), 2-1.
- Reyes-Hernández, A.C., 1993. Efectos de las condiciones atmosféricas de otoño e invierno sobre la formación de masas de agua en el Golfo de

California, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, B.C., México, 91p

Reyes, S., Miranda, F., & García, J., 1990. Climatología de la región noroeste de México (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa). Parte I. Precipitación: Series de tiempo del valor total mensual y estadísticas del año meteorológico. Reporte Técnico CIOFIT9001, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC Ensenada. 105p.

Reyes, S., Douglas, M. W., & Maddox, R. A., 1994. El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP). *Atmósfera*, 7(2), 117-137.

Reyes, A. C., & Lavín, M., 1997. Effects of the autumn-winter meteorology upon the surface heat loss in the northern Gulf of California, *Atmosfera*, 10, 101– 123.

Rincón, M. A., 2012. Acoplamiento del modelo de mesoescala WRF al modelo de calidad del aire Calpuff. PhD Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 104p.

Ripa, P., 1997. Towards a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27 597–614.

Roth, G. D., 2003. *Meteorología*. Ediciones Omega, 1ra Edición, 320p.

Santer, B., Taylor, K., & Corsetti, L., 1995. Statistical evaluation AMIP model performance. Proceedings of the first International AMIP Scientific Conference. World Climate Programme. WCRP-92. WMO/TD N° 732, 13-18.

Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., Lares-Reyes, M. L., Huerta-Díaz, M. A., Muñoz-Barbosa, A., & Torres-Delgado, E. V., 2009. Aporte atmosférico y concentración de hierro disuelto en la capa superficial del Golfo de California. *Ciencias marinas*, 35(1), 75-90.

- Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., Lares-Reyes, M. L., Huerta-Díaz, M. A., Muñoz-Barbosa, A., del Ángel, E. S. y Sañudo-Wilhelmy, S. A., 2011. Vertical distribution of dissolved iron, copper, and cadmium in Ballenas Channel, Gulf of California Distribuciones verticales de hierro, cobre y cadmio disueltos en el canal de Ballenas, golfo de California. *Ciencias marinas*, 37(4A), 457-469.
- SEMARNAT., 2006. Suelos. En: SEMARNAT. *El medio ambiente en México*, 25-35.
- Soetaert, K., & Herman, P. M., (Eds). 2008. *A practical guide to ecological modelling: using R as a simulation platform*. Springer. 367p.
- Shreve, F., 1942. The desert vegetation of North America. *The Botanical Review*, 8(4), 195-246.
- SIAP., 2012. Zonas Áridas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México, Distrito Federal, México. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx>.
- Tanaka, T. Y., & Chiba, M., 2006. A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global and Planetary Change*, 52(1), 88-104.
- Tetra-Tech, Inc., 2008. Modelo conceptual de la fertilización de océanos con hierro. *Climos*, 12(2) 1-6.
- Thunell, R.C., 1998. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate change. *Deep-Sea Res. (Part I)* 45: 2083–3059.
- Turner, R. D., Hunter, K. A., De Baar, J. W., 2001. The iron paradox. In: Turner, D. R., Hunter, K. A. (eds.), *The Biogeochemistry of Iron in Seawater*. John Wiley, New York, pp. 1–7.
- Voiland, A., 2010. Aerosols: Tiny particles, big impact. NASA Earth Observatory. Disponible en: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosols/>.

- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V., 2006. Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92). Academic press.
- Webb, E., 1965. Aerial microclimate. En Agricultural Meteorology. Meteorological Monograph. 28, 6p.
- Wieringa, J. D., Davenport, S., Grimmond, R., & Oke, T., 2001. New revision of Davenport roughness classification. Presented at the 3rd European and African Conference on Wind Engineering. July 2001. Eindhoven Netherlands. Documento en línea. Disponible en: <http://www.kcl.ac.uk/ip/suegrimmond/publishedpapers/DavenportRoughness2.pdf>
- Zea, J. A., Aristizabal, G. E. L., & Ramírez, J. A. E., 2002. Validación de los campos espaciales y la media zonal de la temperatura del aire en superficie y de la precipitación en Colombia simulados por el modelo CCM3 y los datos del NCEP/NCAR Reanalysis. 93p.
- Zender, C.S., Bian, H., Newman, D., 2003. Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: description and 1990s dust climatology. J. Geophys. Res. 108 (D14), 4416.

ANEXOS

Anexo 1. Validación de los Datos de Viento del NARR

Teniendo en cuenta que los datos de viento de la base del NARR son el producto de un modelo en el que se realiza un reanálisis regional se hace necesario validar la eficacia de esta fuente de datos con datos tomadas in situ. Para tal validación se empleó dos metodologías que serán descritas a continuación.

1.1. Significación práctica del modelo NARR

La técnica de validación utilizada en este trabajo hace referencia a la significación práctica del modelo utilizado para dar origen a los datos de viento que se encuentran en la base del NARR, valorada con base en las diferencias observadas y no a la significación estadística pura de estas diferencias. La significación estadística resulta difícil de utilizar, puesto que generalmente se presentan problemas en su determinación, entre los cuales se destacan la autocorrelación espacial y temporal, la multiplicidad y las hipótesis relacionadas con las igualdades de varianzas (Portman et al., 1992; Santer et al., 1995; Zea et al., 2001). El análisis de estas diferencias nos permitirán determinar si son significativamente grandes para rechazar la validez de los datos de viento del modelo empleado en la base de datos NARR.

En esta validación se tendrán en cuenta tres criterios expuestos por Santer et al. (1995): (1) La diferencia entre dos conjuntos de datos derivados independientemente, también llamada incertidumbre observacional, (2) la diferencia entre pares individuales de resultados de modelos con datos tomados in situ, y (3) la diferencia entre décadas individuales de conjuntos de datos multidecadales (Santer et al., 1995; Zea et al., 2001; Orozco-Contreras, 2014).

En este trabajo se hará la validación de los datos de viento del Modelo a través de la utilización de datos de viento observados en las estaciones meteorológicas de Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N) de la república (Fig. 44). Se utilizará la diferencia entre dos conjuntos de datos derivados independientemente o también llamada la incertidumbre observacional. Teniendo en cuenta que la diferencia en cuanto a la resolución temporal de los set de datos, se homogenizarán los datos de viento de las estaciones

meteorológicas promediando cada 3h de tal manera que tengan la misma resolución temporal de los datos de viento del NARR.

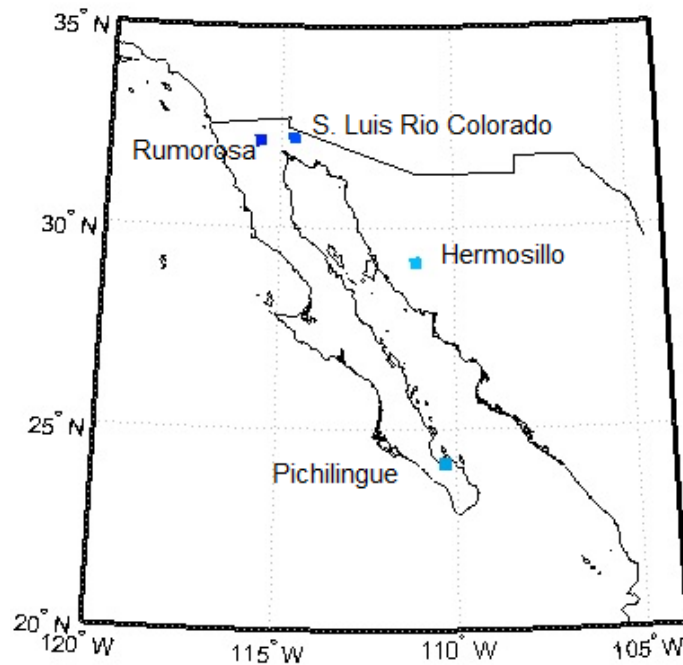


Figura 44. Ubicación de las estaciones meteorológicas y datos extraídos de los puntos de la malla del NARR

Por otro lado se verifica la existencia de las componentes meridional (u) y zonal (v) para los datos NARR por lo que se hará el cálculo de la magnitud de la velocidad para homogenizar estos datos con los datos de las estaciones meteorológicas dado a que los registros originales la dirección del viento están de acuerdo a la convención meteorológica (de donde provienen), mientras que en las componentes u y v la dirección del viento está definido hacia dónde va (convención oceanográfica).

Obtenido los vectores resultantes de las componentes (u) y (v) del vector velocidad de viento se procederá a realizar los estadísticos que incluirán cálculos mensuales de la media, desviación estándar y el error estándar de la desviación (Zea et al., 2001; Orozco-Contreras, 2014).

Media aritmética: Es el valor característico de una serie de datos cuantitativos que son el objeto de estudio, esta parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado y se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

dónde:

$\bar{x}$	media del conjunto de datos a estudiar
N	número de datos a estudiar
x_i	cada elemento del conjunto de datos

Desviación estándar: Es el grado de dispersión que tiene un conjunto de datos con respecto a un dato central y se obtiene de la siguiente manera:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

dónde:

$\bar{x}$	media del conjunto de datos a estudiar
N	número de datos a estudiar
x_i	cada elemento del conjunto de datos
s	desviación estándar

Error estándar de la desviación: Es el grado de correspondencia promedio entre pares del valor pronosticado en el modelo y el valor observado, mientras más pequeño sea este valor significa un menor error entre los valores calculados y los medidos.

$$eee = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}}$$

dónde:

y_i	Cada elemento del conjunto de datos NARR
N	número de datos a estudiar
x_i	cada elemento del conjunto de datos observados

eee

error estándar de la desviación

Chervin, (1980; 1981) propone el uso de un análisis paramétrico de la desviación estándar y una prueba estadística de hipótesis para estudiar la relación existentes entre las variables climáticas de un modelo climático global y las de estaciones meteorológicas, que en nuestro caso se hará de la siguiente manera:

H_0 = Las varianzas de los datos de viento del modelo NARR y las estaciones meteorológicas son iguales.

H_A = Las varianzas de los datos de viento del modelo NARR y las estaciones meteorológicas son diferentes

Cuando la hipótesis nula es aceptada, su intervalo de confianza es del 90% entonces:

$$0.56 < R_2 < 1.78$$

Siendo

$$R_2 = \frac{\delta_N}{\delta_E}$$

donde

δ_N	desviación estándar de los datos del NARR
δ_E	desviación estándar de los datos de la estación meteorológica
R_2	equivalente al coeficiente de Fisher

Para la igualdad de medias Chervin (1981) se basa en la aproximación de la prueba T-Student's para la desigualdad de varianzas empleando la siguiente ecuación:

$$R_1 = \frac{(\mu_N - \mu_E)}{(\sigma_N^2 + \sigma_E^2)^{1/2}}$$

donde

μ_N	media de los datos NARR
μ_E	media de los datos de las Estaciones
δ_N	desviación estándar de los datos NARR
δ_E	desviación estándar de los datos de las estaciones
R_1	equivalente al coeficiente de T-Student's

Para la igualdad de medias Chervin (1981), se propone las siguientes hipótesis:

H_0 = Las medias de los datos de viento del modelo NARR y las estaciones meteorológicas son iguales.

H_A = Las medias de los datos de viento del modelo NARR y las estaciones meteorológicas son diferentes.

Cuando la hipótesis nula es aceptada, el intervalo de confianza es del 95% entonces:

$$-0.71 < R_1 < 0.71$$

1.2. Análisis Espectral (Método de Welch)

En el análisis espectral de los datos de viento del modelo NARR se empleará el método propuesto por Welch (1967), que consiste en dos modificaciones realizadas al método de Bartlett que consisten en: El solapamiento de segmentos de datos conocido como overlap y la obtención de un periodograma modificado para cada secuencia inventanada. De tal manera que el estimador Welch se define como el promedio de los periodogramas modificados que permite identificar que frecuencias introducen mayor energía en una serie de tiempo, representado por la siguiente expresión (Emery y Thompson, 1998):

$$\hat{S}_w(e^{jw}) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} \hat{S}_M^{(i)} e^{jw}$$

donde $\hat{S}_w(e^{iw})$ es el resultado de aplicar el análisis de Fourier sobre cada una de las particiones, K corresponde al número de datos que integran una partición.

1.3. Validación de datos NARR

1.3.1. Significación práctica del modelo NARR

Al evaluar la significación práctica del modelo NARR en cada una de las zonas se pudo verificar que a pesar de que los datos meteorológicos fueron promediados cada 18 registros con la finalidad de homogenizar la resolución temporal de los datos meteorológicos con los intervalos de tiempo instantáneo en los que vienen los datos del modelo NARR (cada tres horas) las medias aritméticas halladas y sus respectivas desviaciones no estuvieron muy alejadas puesto que su diferencia representan ~ 1 valor entre cada resultado obtenido (ver tabla 10, 11, 12, y 13). El análisis paramétrico de la desviación estándar y una prueba estadística de hipótesis utilizada para estudiar la relación existente entre las variables climáticas de un modelo regional del NARR y las de estaciones meteorológicas arrojan resultados favorables para cada una de las zonas (tal como muestran los resultados de las tablas 10, 11, 12, y 13).