

USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS DE TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS HACIA AMBIENTES MARINOS EN PATAGONIA

Augusto César Crespi Abril^{1,2,3}, Alejandra María Isabel Montes¹, Gabriela Noemí Williams², Mauro Fabián Carrasco^{1,2}

¹ Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Facultad de Ciencias Naturales. Sede Puerto Madryn, Argentina.

² Centro Nacional Patagónico (Cenpat) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Puerto Madryn, Argentina.

³ Universidad Nacional del Comahue, Escuela Superior de Ciencias Marinas, San Antonio Oeste, Argentina.

(Manuscrito recibido el 19 de octubre de 2015, en su versión final el 26 de febrero de 2016)

RESUMEN

En este trabajo se estudió el transporte eólico de sedimentos a ambientes marinos en Patagonia mediante el uso de sensores remotos. Se seleccionaron 6 eventos correspondientes a las fechas 22 y 23 de Enero de 2009, 28 de Marzo de 2009, 11 y 12 de Septiembre de 2009 y 24 de Enero de 2010 por ser días con la presencia de plumas de sedimento y baja cobertura de nubes en la región. Los eventos fueron estudiados usando imágenes en color verdadero de alta resolución espacial (250m) del sensor MODIS, un índice de sedimento calculado con las bandas 2,13 μm y 0,469 μm del sensor MODIS y el índice de aerosol atmosférico en ultravioleta del sensor OMI. Estas herramientas fueron útiles para observar los eventos estudiados. Las imágenes RGB permitieron observar cada uno de los eventos con una buena resolución espacial, pero su uso está restringido a escenas con baja cobertura de nubes. El índice de sedimentos permitió incrementar el contraste de las plumas cuando se encuentran sobre el mar y de esta forma se pudieron determinar isolíneas que delimiten cada evento para calcular su área. El índice de aerosol permitió observar los eventos y su principal ventaja radica en el hecho de que no es influenciado por la cobertura de nubes. Sin embargo, tiene una baja resolución espacial ($1^\circ \times 1^\circ$) por lo que solo permite tener una aproximación del área influenciada por las plumas. La distancia máxima estimada de las plumas fue de 450 Km hacia el mar, alcanzando la región del talud continental y el área total influenciada por estos eventos fue de 420.998 Km². En todos los casos, la intensidad del viento superó los 40Km/h y la visibilidad se redujo a menos de 10Km excepto por el día 24 de enero de 2010 en el que se redujo a 25Km. El uso combinado de estas herramientas brinda un panorama adecuado para estudiar los eventos de transporte eólico de sedimentos en Patagonia hacia la plataforma continental argentina.

Palabras clave: aerosoles atmosféricos, Patagonia, plataforma continental argentina

USING REMOTE SENSING FOR THE DETECTION OF EOLIAN DUST TRANSPORT INTO MARINE ENVIRONMENT IN PATAGONIA

ABSTRACT

In this paper, we studied eolian transport of mineral dust to marine environments of Patagonia using remote sensors. Six events were selected corresponding to the dates 22 and 23 of January of 2009, 28 of March of 2009, 11 and 12 of September of 2009 and 24 of January of 2010 because they presented sediment plumes and low cloud coverage in the scene. The events were studied using true color images of high resolution from MODIS sensor, using the sediment index estimated with bands centered in 2,13 μm and 0,469 μm , and atmospheric aerosol index in ultraviolet from OMI sensor. These tools were useful to detect the selected events. RGB images allowed to study each event with a high spatial resolution (250m), but this product is restricted to scenes with low cloud coverage. The sediment index increased the contrast of the plumes when the sediment is over seawater and this was used to determine the isolines that define the area. The aerosol index detected each event and this product has the main advantage that is not influenced by cloud coverage. However, the low spatial resolution ($1^\circ \times 1^\circ$) is a limiting factor to estimate the area of influence of the plumes. The maximum distance from coast to sea of the plumes was 450Km, reaching the continental slope and the total area of influence of these events was estimated in 420.998 Km^2 . On each case, wind intensity was higher than 40Km/h and visibility was reduced to less than 10Km, except in January 24 of 2010 that visibility was reduced to 25Km. The combined use of this tools provided a strong framework to study the eolian transport of mineral dust to sea in Patagonia to argentinean shelf.

Keywords: atmospheric aerosols, Patagonia, argentinean shelf

1. INTRODUCCIÓN

En términos generales los aerosoles atmosféricos pueden afectar el clima de una región en particular de manera directa por la dispersión o absorción de la radiación solar e indirectamente mediante la modificación de la propiedades físicas de las nubes y de los procesos de precipitación (Kaufman y otros, 2002). A su vez, los aerosoles pueden tener una influencia directa sobre los ambientes acuáticos cuando entran en contacto con los mismos ya sea incrementando la productividad por aporte de nutrientes (Mahowald y otros, 2005) o disminuyéndola por el aporte de partículas deletéreas para algunos organismos (Balseiro y otros, 2014). Asimismo, la severidad de algunos de estos eventos puede tener consecuencias desfavorables sobre las actividades humanas ya que afectan la navegación por la disminución de

la visibilidad, afectan la salud de las personas, perjudican las actividades agrícolas y cualquier otro perjuicio debido a daños de equipos por la cantidad de sedimento transportado (Prospero y otros, 2002).

En algunos lugares del planeta, la composición de los aerosoles atmosféricos está dominada por sedimentos minerales. El origen de estos sedimentos es consecuencia de la erosión eólica del suelo. El viento suspende las partículas erosionadas que luego son elevadas a gran altitud por convección y, dependiendo de la intensidad del viento, pueden ser transportadas grandes distancias. Ello deriva en la formación de eventos particulares como tormentas o plumas de sedimentos que pueden ser visibles en imágenes satelitales (Prospero y Lamb, 2003). Estos procesos son particularmente importantes en regiones desérticas ya que la baja humedad del

suelo facilita el proceso de suspensión de las partículas de sedimento. Uno de los ejemplos más estudiados corresponde a los sedimentos provenientes del desierto del Sahara que son transportados por el viento hacia el Océano Atlántico (Prospero, 1996; Swap y otros, 1996; Moulin y otros, 1997; Johansen y otros, 2000). Esta fuente de sedimentos está activa todo el año, especialmente en verano (Prospero, 1996; Higurashi y otros, 2000), y estimaciones realizadas por sensores remotos de la cantidad de sedimentos movilizados hacia el océano arrojan valores de 230×10^9 g por año (Kaufman y otros, 2003).

Hasta el momento se han utilizado diversas técnicas de teledetección para el estudio del transporte eólico de sedimentos en diferentes partes del mundo (Ackerman, 1997; Baddock y otros, 2009; Han y otros, 2013; Liu y otros, 2013; Park y otros, 2014; Qu y otros, 2006). Sin embargo, los resultados de cada uno de los algoritmos en diferentes regiones es muy variable lo que dificulta la generalización sobre valores críticos que permita establecer un criterio de demarcación de las plumas. Esto se debe a que la precisión de la teledetección depende de diversos factores como las propiedades espectrales de los minerales del sedimento atmosférico, la superficie (tierra o mar) sobre la cual se desplaza la pluma de sedimento, la densidad del sedimento en la atmósfera y los tipos de nubes presentes en la escena. Recientemente, Jafari y Malekian (2015) estudiaron el comportamiento de diferentes algoritmos de MODIS y OMI para ciertos eventos de transporte de sedimento en la región del Medio Oriente considerando situaciones en las que las plumas se desplazaban sobre la tierra y sobre el mar. Los autores observaron que los índices IS (MODIS) y IA (OMI) son adecuados para el estudio de estos eventos cuando las plumas se desplazaban sobre el mar.

En la región norte de la Patagonia (entre 40°S y 48°S) existen diversas evidencias (e.g. registros directos e indicadores biológicos y geomorfológicos) de que los vientos son

muy intensos y persistentes (Prohaska, 1976; Barros, 1986). En términos generales, la intensidad promedio de los vientos oscila entre 21.6 km/h y 23 km/h (Labraga, 1994; Schwarzkopf, 2005) y alcanzan valores de 130 Km/h (Crespi-Abril, datos sin publicar). Los vientos provienen fundamentalmente del sector oeste con una predominancia anual del 60% del total de los registros (Williams, 2004; Pontones, 2014). La geomorfología de esta región (fundamentalmente una meseta) junto con el clima árido (escasas lluvias y humedad relativa del aire $<5\%$) favorecen la suspensión y transporte del sedimento depositado sobre la superficie continental hacia los ambientes marinos de la Plataforma Continental Argentina (PCA) y Atlántico Sur (AS). Gaiero y otros (2003) realizaron cuantificaciones sobre el material eólico transportado estimando valores entre 0,2 y $7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mes}^{-1}$ dependiendo de la localidad y del mes del año. Si bien en dicho trabajo los autores brindan una aproximación sobre este proceso, los datos obtenidos se corresponden a unas pocas localidades puntuales sobre el continente y no es posible determinar la extensión total de dicho proceso y su alcance sobre la PCA.

En el presente trabajo se estudiarán eventos de transporte eólico de sedimentos hacia la plataforma continental mediante el uso de información proveniente de los sensores remotos MODIS y OMI junto con datos meteorológicos de intensidad de viento y visibilidad. A la luz de los resultados se discutirán los alcances de cada enfoque utilizado con el objeto de avanzar en el conocimiento de este proceso y de desarrollar una herramienta adecuada para la detección del mismo.

2. DATOS Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde a la región costera de Argentina comprendida entre los 40°S y 50°S (figura 1). De esta región se seleccionaron los días 22 y 23 de Enero de 2009, 28 de Marzo de 2009, 11 y 12 de Septiembre de 2009 y 24 de Enero de 2010 por poseer una baja

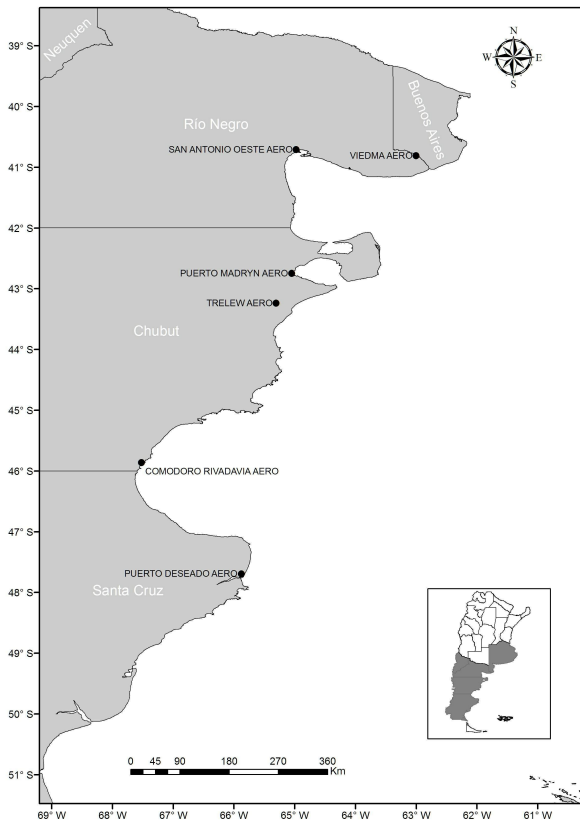


Figura 1: Mapa con el área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional sobre la costa patagónica.

cobertura de nubes en la escena y con eventos notables de transporte de sedimentos hacia la plataforma continental. Los eventos observados en cada una de estas fechas fueron abordados con tres aproximaciones metodológicas: 1) análisis de imágenes MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer montado sobre la plataforma AQUA), 2) análisis de imágenes del producto 'índice de aerosol' (IA) del sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument montado sobre la plataforma AURA) y 3) análisis de datos meteorológicos de visibilidad e intensidad de viento.

Las imágenes del sensor MODIS se descargaron del portal de Ocean Color de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/>) en un nivel de procesamiento L1A (tipo de

reprocesamiento 2014.0 para AQUA). Mediante el programa SeaDAS 7.2 (McClain y otros, 2004) fueron convertidas a nivel L1B aplicando las correcciones radiométricas correspondientes de manera de obtener valores de reflectancia y emisividad al tope de la atmósfera para las diferentes bandas. Luego se procedió al desarrollo de dos productos para la mejor visualización de los eventos de transporte de sedimento sobre el mar: 1) imagen en color verdadero (RGB) con una resolución espacial de 250m e 2) índice normalizado de sedimento (IS) con una resolución espacial de 500m (Qu y otros, 2006). En el primer caso, la imagen RGB se obtuvo mediante una combinación de las bandas 1 ($0,64 \mu m$), 3 ($0,555 \mu m$) y 4 ($0,488 \mu m$). En el segundo caso, el primer paso consistió en enmascarar las nubes mediante el uso de la banda térmica 32 ($12,020 \mu m$) y luego se calculó el IS de la siguiente forma:

$$IS = \frac{\rho_{2,13\mu m} - \rho_{0,469\mu m}}{\rho_{2,13\mu m} + \rho_{0,469\mu m}} \quad (1)$$

donde IS es el índice normalizado de sedimentos y ρ es la reflectancia al tope de la atmósfera en las bandas 7 ($2,13 \mu m$) y 3 ($0,469 \mu m$). Este índice es adimensional y los valores más elevados indican mayor concentración de sedimentos. Con el objeto de caracterizar los eventos de transporte, se estimó la extensión de la pluma de sedimento atmosférico tomando la distancia en línea recta desde la costa hasta la región más lejana en la que se observó la misma a partir de las imágenes RGB e IS. Particularmente con el IS, se calcularon isólinas para determinar el límite de las plumas y así poder calcular la superficie total cubierta por cada evento. Todas las imágenes utilizadas fueron corregidas geométricamente al sistema de coordenadas (latitud-longitud) WGS84.

El IA detecta la presencia de aerosoles que absorben radiación en la franja UV del espectro. En términos generales, este índice representa con valores positivos los aerosoles que absorben UV, como sedimentos minerales y materiales de combustión, y con valores negativos los aerosoles que no absorben en UV, como las nubes. Por lo tanto, las imágenes de IA del sensor

OMI representan una fuente de información complementaria para monitorear los sedimentos en la atmósfera en Patagonia en días con cobertura de nubes en la región. Este índice es adimensional y los valores positivos indican mayor concentración de sedimentos. Sin embargo, para conocer el comportamiento de IA con los eventos de transporte de sedimentos en la región, se analizaron las imágenes para las fechas mencionadas y se compararon con los productos obtenidos para MODIS. Las imágenes de IA se descargaron del portal GIOVANNI de la NASA (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) con una resolución espacial de 1° (tipo de reprocesamiento 003).

Adicionalmente, se analizaron los datos de intensidad de viento y visibilidad en los sitios donde fueron observados dichos eventos con el objeto de caracterizar los eventos de transporte de sedimentos mediante observaciones meteorológicas. Para ello, se trabajó con bases de datos de 6 estaciones costeras sobre Patagonia (Figura 1) que fueron facilitadas por el Servicio Meteorológico Nacional. Los datos correspondieron a registros horarios de intensidad de viento expresada en kilómetros por hora y de visibilidad expresada en kilómetros para un periodo de 15 años (2000-2014). La visibilidad se estima como la distancia máxima a la que puede verse y reconocerse un objeto negro de dimensiones apropiadas (cualquier objeto de referencia a una distancia conocida) a la luz del día con el cielo del horizonte como fondo (Draghici y otros, 2001). Las mediciones de vientos se realizaron mediante anemómetros instalados en estaciones meteorológicas ubicadas a una altura de 10m sobre el suelo para evitar interferencias con cualquier tipo de obstáculo (Draghici y otros, 2001).

3. RESULTADOS

El día 22 de enero de 2009 se registró un evento de transporte de sedimentos sobre la región costera de la localidad de Viedma (41°S) (Figura 2A). Este evento se puede observar en la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso

18:00HL) y puede diferenciarse de una nube en base a su coloración característica. El IS facilitó la detección del sedimento presente en la atmósfera cuando la pluma se encuentra sobre el mar y permite establecer su contorno con una isolínea de valor 0,4 (Figura 2C). La pluma de sedimento alcanzó una distancia de 200 Km desde la costa hacia la plataforma continental (Figura 2A), y la superficie de influencia fue estimada en 10.876 Km². Este evento también fue detectado por el IA alcanzando valores máximos de 2,45 en la región cercana a la costa y una consecuente disminución gradual en dirección de la plataforma adyacente (Figura 2B). Los datos in situ registraron intensidades de viento de 45 Km/h del sector noroeste (dirección 340°) y la visibilidad disminuyó a 5 Km (Figura 2G). El día 23 de enero de 2009 se detectó otro evento de transporte de sedimentos sobre la misma región con el sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:40). En este caso, la pluma alcanzó una mayor distancia (350 Km) sobre la plataforma continental ocupando un área de 34.040 Km² (Figura 2D). El contorno de esta pluma estuvo definido por la isolínea de 0,4 del IS (Figura 2F). En la imagen de IA se puede observar la pluma, pero los valores alcanzados (0,889 y 1,667) fueron menores a los registrados para el día anterior (Figura 2E). Durante el día 23 se registraron valores de 47 Km/h de intensidad de viento del sector noroeste (dirección 316°) y la visibilidad disminuyó a 3 Km (Figura 2G).

El día 28 de marzo de 2009 se registró con el sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:40HL) un evento de transporte de sedimentos en la región de Viedma que alcanzó una distancia aproximada desde la costa hacia plataforma continental de 450 Km (Figura 3A). Si bien la mayor intensidad se registró en Viedma, el evento abarcó la mayor parte de la costa patagónica, alcanzado la localidad de Puerto Deseado. Durante este día se generó un frente de más de 850 Km (desde Viedma a Puerto Deseado) con plumas de diferentes magnitudes a lo largo de su extensión (Figura 3A). El área total estimada fue 297.769 Km². El contorno de este evento estuvo definido por la isolínea de valor 0,7 de IS

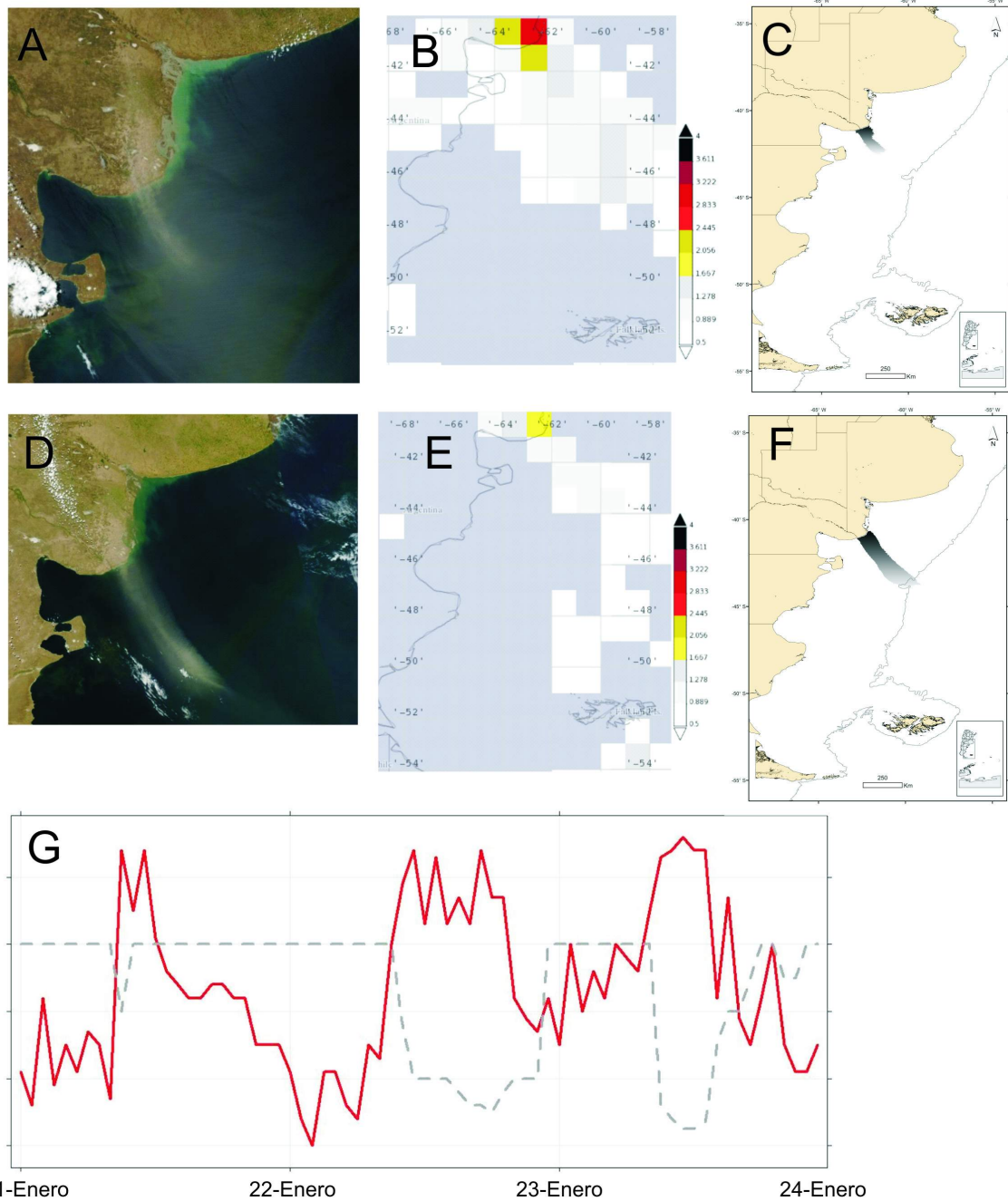


Figura 2: Evento de transporte eólico de sedimentos. Imagen en color verdadero del sensor MODIS para los días 22 (A) y 23 (D) de enero de 2009. Índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI para los días 22 (B) y 23 (E) de enero de 2009. Área influenciada por las plumas de los eventos del día 22 (C) y 23 (F) de enero de 2009 obtenidas a partir de los valores del índice de sedimentos. Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Viedma del Servicio Meteorológico Nacional (G). En ambos casos, el contorno de la pluma estuvo delimitado por la isolínea de 0,4 del IS.

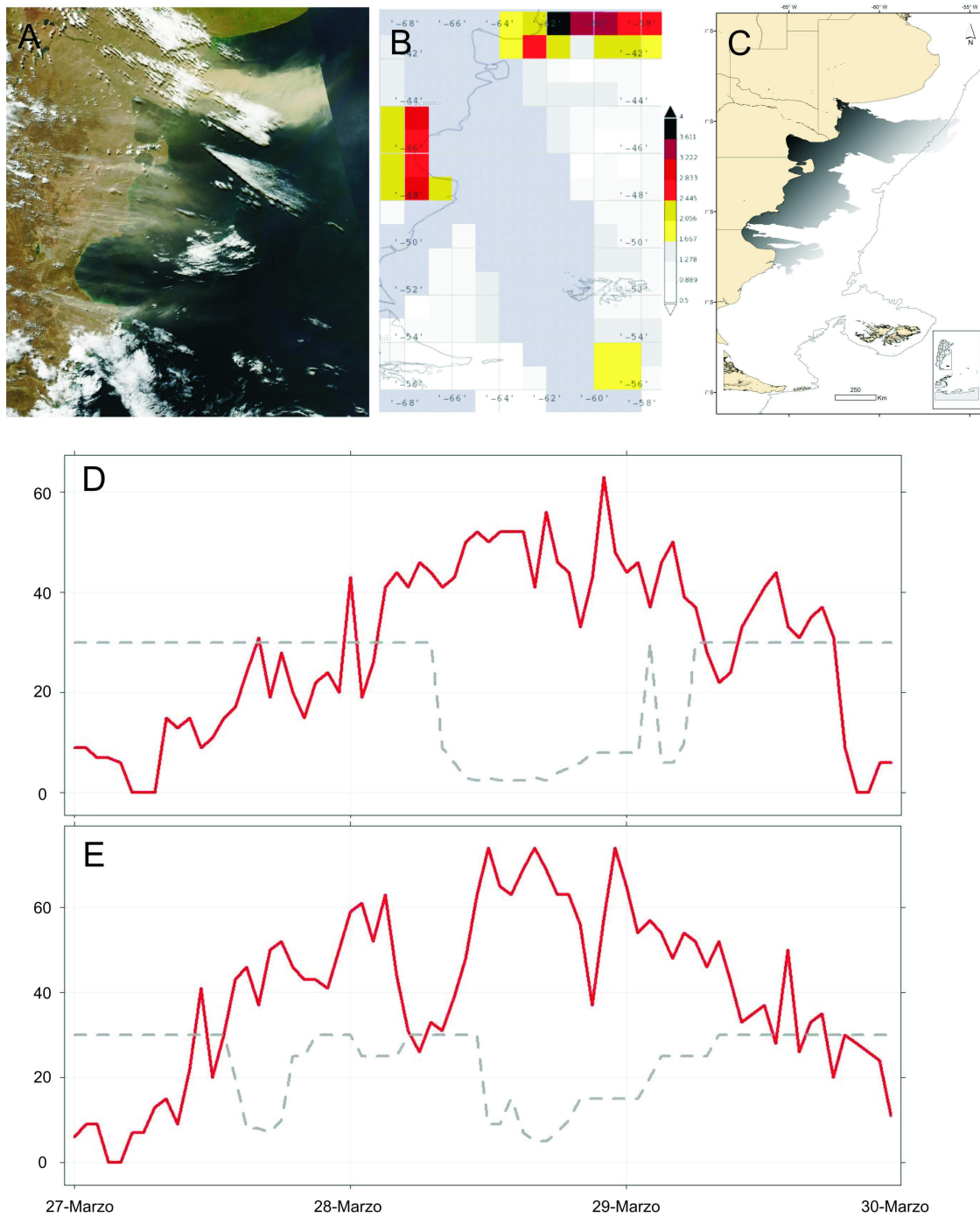


Figura 3: Evento de transporte eólico de sedimentos del día 28 de marzo de 2009 en una imagen en color verdadero del sensor MODIS (A) en el producto de índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI (B). Área influenciada por el evento obtenida a partir de los valores del índice de sedimento (C). Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Viedma (D) y Comodoro Rivadavia (E) del Servicio Meteorológico Nacional. El contorno de este evento se definió en base a la isolínea de valor 0,7 del IS.

(Figura 3C). La imagen de IA indica dos regiones con máximos valores del índice en la región de Viedma y en la región del golfo San Jorge y los valores oscilaron entre 2,056 y 3,611 (Figura 3B). Los vientos registrados fueron muy intensos alcanzando valores superiores a 70 Km/h del sector noroeste (dirección 285°) y 60 Km/h del sector noroeste (dirección 290°) en Comodoro Rivadavia y Viedma respectivamente; mientras que la visibilidad se redujo significativamente alcanzando 6 Km y 2 Km en ambas localidades (Figura 3D y E).

El día 11 de septiembre de 2009 ocurrió un evento de suspensión de sedimento en Viedma que alcanzó una distancia de 100 Km y abarcó un área de 23.734 Km² que fue visible con la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:50HL) (Figura 4A). El contorno de este evento quedó definido por la isolínea del IS correspondiente al valor 0,7 (Figura 4C). La imagen de IA muestra una coincidencia espacial con la localización del evento respecto a la imagen RGB, los valores de este índice variaron entre 1,667 y 2,056 (Figura 4B). Los datos de la estación meteorológica indicaron que el viento alcanzó 47 Km/h del sector noroeste (dirección 320°) y la visibilidad se redujo a 10 Km (Figura 4F). El día siguiente (12 de septiembre) se registró un nuevo evento en Viedma que alcanzó una distancia aproximada de 120 Km cubriendo un área de 5.377 Km² que fue visible con la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso 17:55HL) (Figura 4D). El contorno de esta pluma correspondió a la isolínea de valor 0,7 del IS (Figura 4E). En este caso, no se dispone de datos a IA provenientes del sensor OMI, pero en base a los valores de IS se puede determinar que la intensidad del evento fue menor al registrado el día 11. La intensidad de viento fue de 41 Km/h del sector noroeste (dirección 330°) y la visibilidad se redujo a 7 Km (Figura 4F).

El día 24 de enero de 2010 se registró un evento de transporte de sedimentos en la localidad de Puerto Deseado que fue visible con la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:50HL) (Figura 5A). Dicho evento alcanzó una

distancia aproximada desde la costa de 460 Km hacia plataforma continental abarcando un área de 140.973 Km². En este caso, el contorno del evento quedó definido por la isolínea de valor 0,8 del IS (Figura 5C). La imagen IA tuvo una correspondencia espacial con la imagen RGB (Figura 5B) y los valores máximos del índice alcanzaron 3,222. En la estación meteorológica de Puerto Deseado, se registraron valores de intensidad de viento de 57 Km/h del sector sur (dirección 89°) y la visibilidad se redujo a 25 Km (Figure 5D).

4. CONCLUSIONES

Los estudios sobre el transporte eólico de sedimentos en la región Patagónica han cobrado especial relevancia en los últimos años por su rol en la regulación del clima a nivel global (Gassó y Stein, 2007; Johnson y otros, 2010; Gassó y otros, 2010a; Johnson y otros, 2011). Estos estudios se basaron en la medición del sedimento atmosférico mediante el uso de colectores en sitios puntuales de Patagonia (Gaiero y otros, 2003; Gaiero y otros, 2004) o en la simulación de eventos de transporte mediante el uso de modelos numéricos (Gassó y otros, 2010b; Johnson y otros, 2010). Sin embargo, pocos estudios han utilizado herramientas de sensores remotos para estudiar las características de los eventos de transporte eólico de sedimentos hacia ambientes marinos. En este trabajo se utilizaron tres productos de dos sensores remotos para estudiar 6 eventos particulares. Los productos RGB e IS obtenidos del sensor MODIS permitieron describir los eventos de una manera adecuada debido a su alta resolución espacial de 250m y 500m respectivamente. Las imágenes RGB fueron claras para visualizar el fenómeno ya que son muy intuitivas respecto a los colores reales obtenidos. Sin embargo, con este producto no se pueden establecer valores específicos de reflectancia para delimitar los límites de las plumas de sedimentos suspendidas. El producto IS destacó notablemente las plumas de sedimento localizadas sobre el agua de mar y en cada caso se pudo determinar un valor específico para delimitar claramente el alcance de las mismas.

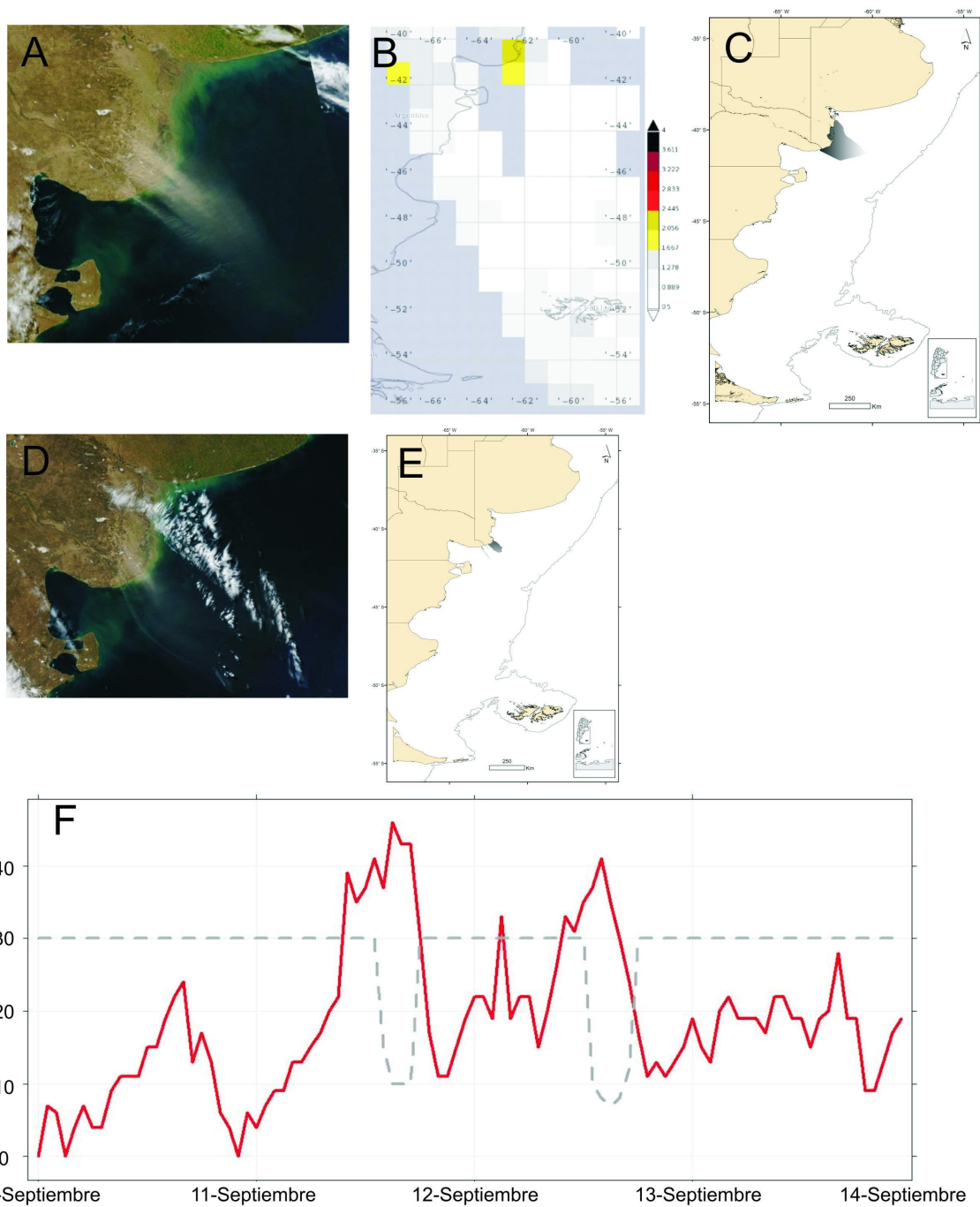


Figura 4: Evento de transporte eólico de sedimentos. Imagen en color verdadero del sensor MODIS para los días 11 (A) y 12 (D) de septiembre de 2009. Índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI para el día 11 (B) de septiembre de 2009. Área de influencia de los eventos del día 11 (C) y 12 (E) obtenida a partir de los valores del índice de sedimentos. Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Viedma (F) del Servicio Meteorológico Nacional. En ambos casos, el contorno de la plumas estuvo definido por la isolínea de valor 0,7 del IS.

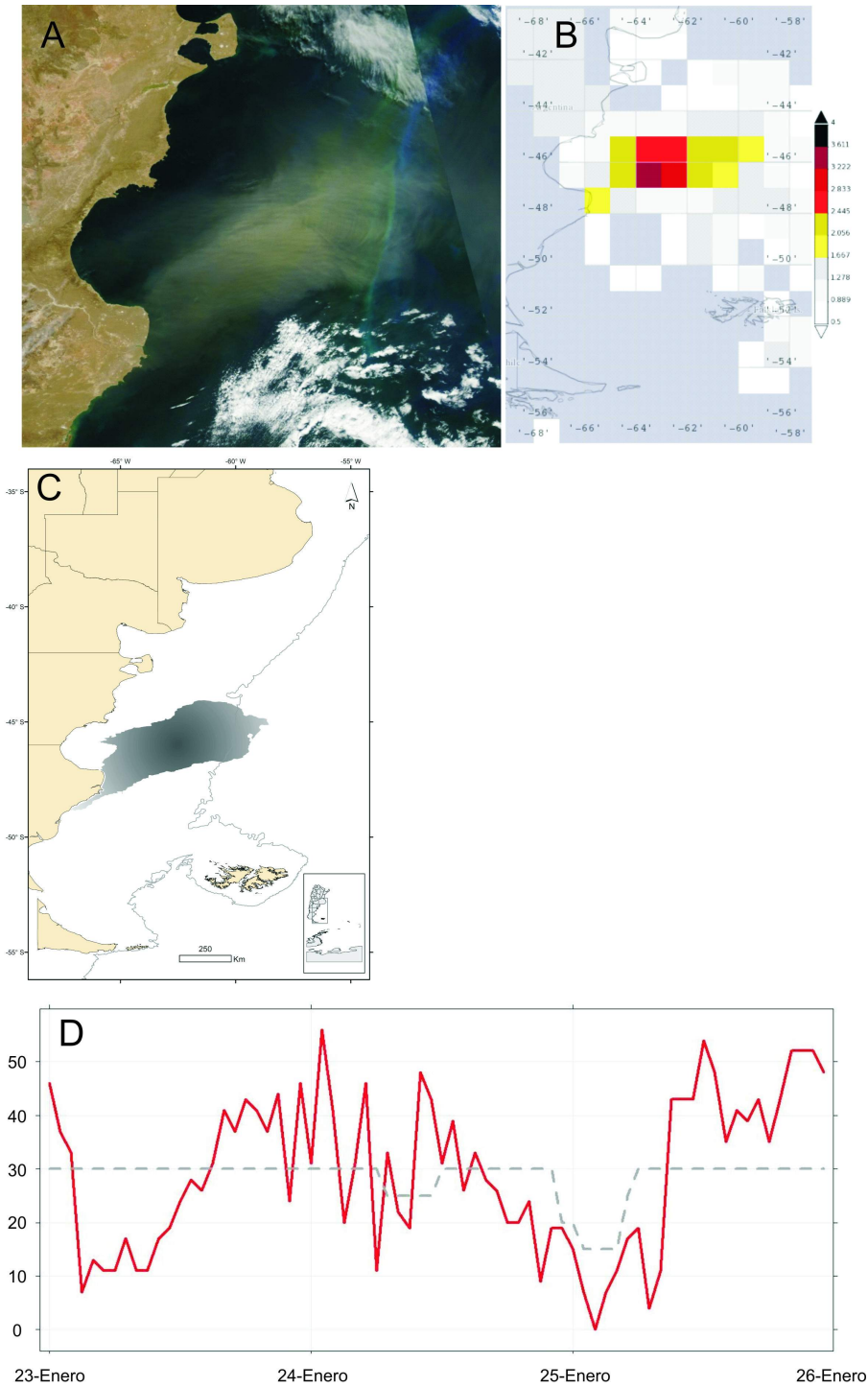


Figura 5: Evento de transporte eólico de sedimentos del día 24 de enero de 2010 en una imagen en color verdadero del sensor MODIS (A) en el producto de índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI (B). Área influencia por el evento obtenida a partir de los valores del índice de sedimentos (C). Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Puerto Deseado (D) del Servicio Meteorológico Nacional. El contorno de este evento estuvo definido por la isolínea de valor 0.8 del IS.

Este producto ha sido implementado con éxito para estudiar las tormentas de sedimentos en la región asiática al norte de China (Qu y otros, 2006; Jafari y Malekian, 2015), y esta es la primera vez que se explora su utilidad para describir estos fenómenos en Patagonia. Una limitación que tienen ambos tipos de productos es que están basados en bandas de longitudes de ondas del espectro visible. Esto implica que no es posible estudiar estos fenómenos durante la noche o en momentos con alta cobertura de nubes. En el primer caso, habría que explorar algún algoritmo basado en bandas del espectro infrarrojo. Este enfoque fue utilizado con éxito en el monitoreo de cenizas volcánicas en la atmósfera (Prata, 1989a; Prata, 1989b). En el segundo caso, habría que trabajar con bandas en el espectro UV donde las nubes no tienen absorción de la radiación. En este sentido, se exploró el comportamiento del índice IA del sensor OMI. En todos los casos estudiados, el índice representó adecuadamente la magnitud, localización y extensión de cada uno de los eventos comparado con lo que se observó en los productos obtenidos del sensor MODIS. Un aspecto a tener en cuenta sobre el producto IA es su baja resolución espacial respecto a MODIS. Sin embargo, este producto tiene una gran potencialidad para estudiar los eventos de transporte eólico en Patagonia por tres aspectos. En primer lugar, su baja resolución espacial no es limitante para una región tan extensa. En segundo lugar, se puede estudiar la variación temporal de este fenómeno ya que el IA no está influenciado por la cobertura de nubes en la escena. Por último, puede detectar eventos durante la noche ya que no utiliza la región visible del espectro electromagnético.

Los fenómenos de transporte eólico de sedimentos pueden ser estudiados desde la superficie terrestre por medio del uso de fotómetros solares de la red de AERONET (Holben y otros, 1998). Particularmente, en la región patagónica, Otero y otros (2003) han utilizado estos instrumentos para caracterizar los aerosoles atmosféricos. Estos instrumentos son altamente precisos y realizan estimaciones de la densidad óptica de la atmósfera que se utiliza para calibrar las

mediciones de aerosoles realizadas por sensores remotos. Sin embargo, los fotómetros están localizados solo en algunas localidades de la región patagónica. Por lo tanto las mediciones de aerosoles atmosféricos desde la superficie terrestre están confinadas a determinados sitios, lo que limita la capacidad de realizar estudios de los fenómenos de transporte eólico de sedimentos. En este sentido, el parámetro de visibilidad en la atmósfera puede ser utilizado para describir estos fenómenos ya que es registrado en diversas estaciones meteorológicas de manera estandarizada a lo largo de la región patagónica. Si bien la visibilidad es un parámetro notablemente impreciso respecto a las mediciones de los fotómetros, en el presente trabajo se observó que la visibilidad disminuyó significativamente (menos de 10Km) en todos los eventos considerados (excepto el día 24 de enero de 2010). En consecuencia, la visibilidad de la atmósfera puede ser un indicador adecuado de la cantidad de sedimento suspendido en la atmósfera. Este parámetro es particularmente relevante si se lo considera junto con la intensidad del viento. Todos los eventos estudiados en el presente trabajo se produjeron con intensidades de viento superiores a los 40Km/h. Es de esperar que a altas intensidades de viento haya una mayor concentración de sedimento suspendido en la atmósfera (Chomette y otros, 1999).

En los casos estudiados las plumas de sedimentos alcanzaron distancias comprendidas entre 100 Km y 460 Km desde el continente hacia la plataforma submarina. El área de influencia de estos eventos fue de 420.998 Km² y abarcó gran parte de la plataforma continental de la región patagónica (Figura 6). La composición mineral de los sedimentos que son transportados por el viento está caracterizada fundamentalmente por la presencia de SiO₂ (50 %), de Al₂O₃ (10 %) y Fe₂O₃ (5 %) (Gaiero y otros, 2007). De esta forma, se pone en evidencia la existencia de un aporte de nutrientes minerales (Fe y Si) desde el continente hacia la plataforma continental y talud que podría incrementar la productividad primaria en la región. Además, algunos estudios basados en simulaciones numéricas (Gassó y

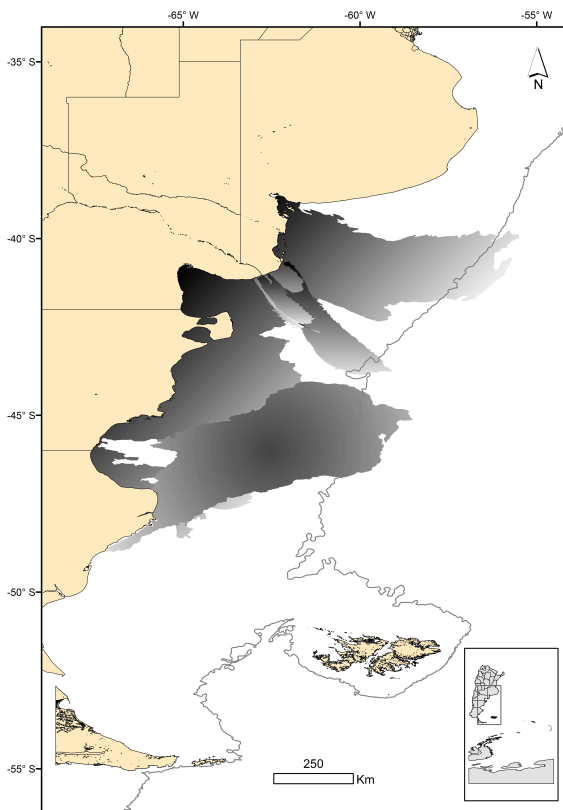


Figura 6: Mapa con el área de influencia de los diferentes eventos de transporte eólico de sedimentos de las fechas 22 y 23 de enero de 2009, 28 de marzo de 2009, 11 y 12 de septiembre de 2009 y 24 de enero de 2010. El contorno de cada evento fue definido en base a los valores del índice de sedimento.

Stein, 2007) y en el análisis de núcleos de hielo (McConnell y otros, 2007) sugieren que el sedimento transportado desde Patagonia alcanza la península Antártica, sugiriendo que el impacto sobre la productividad primaria del Océano Atlántico se extiende más allá de la plataforma continental. En el presente trabajo no se pudieron observar plumas de sedimentos con semejante extensión debido a que las partículas de sedimentos se diluyen en la atmósfera y dejan de ser detectadas por los sensores remotos utilizados.

El uso de sensores remotos y de observaciones desde la superficie terrestre son herramientas

adecuadas para realizar estimaciones sobre el sedimento suspendido en la atmósfera en la región patagónica, pero presentan algunas limitaciones que dificultan el estudio del transporte eólico. Sin embargo, en el presente trabajo se determinó que el uso combinado de ellas permite tener observaciones más adecuadas del sedimento suspendido lo que permitiría estudiar más precisamente los eventos de transporte eólico.

Agradecimientos: Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Frumento por su aporte a la interpretación de los resultados, al Dr. Haller por sus contribuciones a la mejora del manuscrito y presentación de los resultados, a los revisores por sus aportes para mejorar el trabajo y al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar los datos de sus estaciones meteorológicas. Los análisis y visualizaciones usadas en este estudio fueron realizadas por el sistema de datos en línea Giovanni que son desarrollados y mantenidos por NASA GES DISC. Este trabajo fue financiado por el proyecto PICT-2015-1837 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

REFERENCIAS

- Ackerman, S. A., 1997. Remote Sensing Aerosols Using Satellite Infrared Observations. *J. Geophys. Res.*, 102, 17069–17080, doi:10.1029/96JD03066.
- Baddock, M. C., Bullard, J. E. y Bryant, R. G., 2009. Dust Source Identification Using MODIS: A Comparison of Techniques Applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sens. Environ.*, 113, 1511–1528, doi:10.1016/j.rse.2009.03.002.
- Balseiro, E., Souza, M.S., Serra-Olabuenaga, I., Wolinski, L., Bastidas-Navarro, M., Laspoumaderes, C. y Modenutti, B., 2014. Effect of the Puyehue-Cordon Caulle volcanic complex eruption on crustacean zooplankton of Andean lakes. *Ecología Austral*, 24, 1, 75-82.
- Barros, V.R., 1986. Atlas del Potencial Eólico del Sur Argentino. Informe Técnico del Centro Nacional Patagónico, Puerto Madryn, 293 pp.

- Chomette, O., Legrand, M. y Marticorena, B., 1999. Determination of the wind speed threshold for the emission of desert dust using satellite remote sensing in the thermal infrared. *J Geophys Res D*, 104, D24, :31207-31215.
- Draghici, I.F., Necco, G.V., Riddaway, R.W., Snow, J.T., Billard, C. y Ogallo, L.A., 2001. Directivas de orientación: La enseñanza y formación profesional del personal en meteorología e hidrología operativa. OMM-NO 258, Volumen I. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. 143 pp.
- Gaiero, D.M., Probst, J.L., Depetris, P.J., Bidart, S.M. y Leleyter, L., 2003. Iron and other transition metals in Patagonian riverborne and windborne materials: Geochemical control and transport to the southern Atlantic Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, 19, 3603-3623, doi: 10.1016/S0016-7037(03)00211
- Gaiero, D.M., Depetris, P.J., Probst, J.L., Bidart, S.M. y Leleyter, L., 2004. The signature of river-and wind-borne materials exported from Patagonia to the southern latitudes: a view from REEs and implications for paleoclimatic interpretations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 219, 3, 357-376.
- Gaiero, D. M., Brunet, F., Probst, J. L. y Depetris, P. J., 2007. A uniform isotopic and chemical signature of dust exported from Patagonia: Rock sources and occurrence in southern environments. *Chemical Geology*, 238, 1-2, doi:10.1016/j.chemgeo.2006.11.003.
- Gassó, S. y Stein, A.F., 2007. Does dust from Patagonia reach the sub-Antarctic Atlantic Ocean?. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01801, doi:10.1029/2006GL027693.
- Gassó, S., Stein, A., Marino, F., Castellano, E., Udisti, R. y Ceratto, J., 2010a. A combined observational and modeling approach to study modern dust transport from the Patagonia desert to East Antarctica. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 17, 8287-8303.
- Gassó, S., Grassian, V. H y Miller, R. L., 2010b. Interactions between mineral dust, climate, and ocean ecosystems. *Elements*, 6, 4, 247-252.
- Han, L., Tsunekawa, A. Tsubo, M. y Zhou, W., 2013. An Enhanced Dust Index for Asian Dust Detection with MODIS Images. *Int. J. Remote Sens.*, 34, 6484-6495, doi:10.1080/01431161.2013.802055.
- Higurashi, A., Nakajima, T., Holben, B.N., Smirnov, A., Frouin, R. y Chatenet, B., 2000. A study of global aerosol optical climatology with twochannel AVHRR remote sensing. *J. Clim.*, 13, 12, 2011-2027.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I. y Smirnov, A., 1998. AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens. Environ*, 66, 1-16
- Jafari, R. y Malekian, Mansoureh, R., 2015. Comparison and evaluation of dust detection algorithms using MODIS Aqua/Terra Level 1B data and MODIS/OMI dust products in the Middle East. *Int. J. Remote. Sens.*, 36, 2, 597-617.
- Johansen, A. M., Siefert, R.L. y Hoffmann, M.R., 2000. Chemical composition of aerosols collected over the tropical North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 105, D12, 15277-15312.
- Johnson, M.S., Meskhidze, N., Solmon, F., Gassó, S., Chuang, P. Y., Gaiero, D.M., Yantosca, R.M., Wu, S.L., Wang, Y.X y Carouge, C., 2010. Modeling dust and soluble iron deposition to the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res. D*, 115, 15, 1984-2012.
- Johnson, M.S., Meskhidze, N., Kiliyanpilakkil, V.P. y Gassó, S., 2011. Understanding the transport of Patagonian dust and its influence on marine biological activity in the South Atlantic Ocean. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 6, 2487-2502.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D. y Boucher, O., 2002. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419, 215-223
- Kaufman, Y.J., Koren, I., Remer, L., Tanré, D., Ginoux, P. y Fan, S., 2003. Dust transport and deposition observed from the Terra-MODIS spacecraft over the Atlantic Ocean. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 1-12.
- Labruga, J.C, 1994. Extreme Winds in the Pampa del Castillo Plateau, Patagonia, Argentina,

- with Reference to Wind Farm Settlement. *J. Appl. Meteorol.*, 33, 1, 85-95.
- Liu, Y., Liu, R. y Cheng, X., 2013. Dust Detection over Desert Surfaces with Thermal Infrared Bands Using Dynamic Reference Brightness Temperature Differences. *J. Geophys. Res. D*, 118, 8566–8584.
- Mahowald, N.M., Baker, A.R., Bergametti, G., Brooks, N., Duce, R.A., Jickells, T.D., Kubilay, N., Prospero, J.M. y Tegen, I., 2005. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Global biogeochem. cycles*, 19, 4, (art. no.—GB4025).
- McClain, C.R., Feldman, G. C. y Hooker, S. B., 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep Sea Res. II*, 51, 5-42.
- McConnell, J.R., Aristarain, A.J., Banta, J.R., Edwards, P.R. y Simões, J.C., 2007. 20th-Century doubling in dust archived in an Antarctic Peninsula ice core parallels climate change and desertification in South America. *PNAS*, 104, 14, 5743-5748.
- Moulin, C., Guillard, F., Dulac, F. y Lambert, C.E., 1997. Long-term daily monitoring of Saharan dust load over ocean using Meteosat ISCCP-B2 data: 2. Accuracy of the method and validation using Sun photometer measurements. *J. Geophys. Res.*, 102, D14, 16959– 16969.
- Otero, L.A., Ristori, P.R., Fochesatto, G.J., Quel, E.J. y Holben, B., 2003. Estadística de la evolución de los aerosoles medidos en las estaciones de la red AERONET en Argentina desde 1999. *Anales AFA*. 15, 23-328.
- Park, S. S., Kim, J., Lee, J., Lee, S., Kim, J. S., Chang, L. S. y Ou, S., 2014. Combined Dust Detection Algorithm by Using MODIS Infrared Channels over East Asia. *Remote Sens. Environ.*, 141, 24–39, doi:10.1016/j.rse.2013.09.019.
- Pontones, J., 2014. Análisis de los patrones espaciales de la energía y altura de las olas en el golfo Nuevo y su efecto sobre algunas especies marinas. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. 35pp.
- Prata, A.J., 1989a. Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 11, 1293-1296.
- Prata, A.J. 1989b. Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 μm window using AVHRR/2 data. *Int. J. Remote Sens.*, 10, 4-5, 751-761.
- Prohaska, F., 1976. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. *Climate of Central and South America. World Survey of Climatology. vol. II H. Landsberg, Ed. Elsevier Press*, págs. 57-69.
- Prospero, J.M., 1996. Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An overview. *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean. S. Guerzoni y R. Chester Eds. Kluwer Academic Press*. págs 133 – 151.
- Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. y 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. *Rev. Geophys.*, 40, 1002-1033.
- Prospero, J.M. y Lamb, P., 2003. African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications. *Science*, 302, 1024– 1027.
- Qu, J.J., Hao, X., Kafatos, M. y Wang, L., 2006. Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *Geosci. Re. Sen. Lett. IEEE*, 3, 4, 484-486.
- Schwarzkopf, M.L. 2005. Fundamentos meteorológicos que sustentan el trazado de isóneas de la velocidad básica del viento. Reglamento CIRSOC 102-2005. disponible en: www.inti.gob.ar/cirsoc/102.htm
- Swap, R., Ulanski, S., Cobbett, M. y Garstang, M., 1996. Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks. *J. Geophys. Res.*, 101, D2, 4205–4220.
- Williams, G.N. 2004. ¿Cuáles son las fuentes de nutrientes para mantener la productividad del golfo San Matías? Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. 100pp.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.