

BOLETÍN

INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ

ISSN 0458-7766

VOLUMEN 34, Número 1



Enero - Junio 2019
Callao, Perú



PERÚ

Ministerio
de la Producción

DETECCIÓN DE POSIBLE DERRAME DE PETRÓLEO EN EL MAR PERUANO FRENTE A TALARA USANDO IMÁGENES SATELITALES, FEBRERO 2017

DETECTION OF A POSSIBLE OIL SPILL IN THE PERUVIAN SEA OFF TALARA THROUGH SATELLITE IMAGES, FEBRUARY 2017

Germán Velaochaga¹

Han Xu¹

RESUMEN

VELAOCHAGA G, XU H. 2019. Detección de un posible derrame de petróleo en el mar peruano frente a Talara a través de imágenes satelitales, febrero 2017. *Bol Inst Mar Perú*. 34(1): 265-276.- Los derrames de petróleo tienen un impacto significativo en el ecosistema marino, la detección remota es una herramienta eficiente para revelar estos eventos con el fin de reducir el daño generado. Se utilizaron imágenes de los satélites ópticos (Landsat-8, Sentinel-2a y NPP) y del radar (Sentinel-1B) para generar la firma espectral, la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) y la razón de bandas. Para el día 15 de febrero del 2017, la firma espectral de los cuerpos de agua en el área del posible derrame se encontró sobre el agua oceánica y la imagen de TSM mostró un aumento de temperatura ($>0,4$ °C) en dicha área, además el coeficiente "petróleo/agua" tuvo un valor máximo de 3,407 para la longitud de onda central $\lambda = 0,864$, 6 nm, lo cual implica la mayor sensibilidad del canal con respecto a la información de petróleo. Asimismo, al revisar imágenes de los satélites Sentinel-1B y -2A del 3 y 19 de febrero, se observó una pluma que se desprende desde la plataforma activa y se desplaza hacia el suroeste. El objetivo del trabajo es presentar una serie de técnicas para la detección de derrames de petróleo en el mar utilizando las imágenes de satélite, a fin de desarrollar un sistema de monitoreo para las áreas cercanas de las plataformas petroleras en el mar peruano.

PALABRAS CLAVE: detección de derrame de petróleo, TSM, firma espectral, imágenes satelitales

ABSTRACT

VELAOCHAGA G, XU H. 2019. Detection of a possible oil spill in the Peruvian sea off Talara through satellite images, February 2017. *Bol Inst Mar Peru*. 34 (1): 265-276.- Oil spills have a significant impact on the marine ecosystem, remote sensing is an efficient tool to reveal these events in order to reduce the resulting damage. Images from the optical satellites (Landsat-8, Sentinel-2a, and NPP) and radar (Sentinel-1B) were used to generate the spectral signature, the Sea Surface Temperature (SST), and the band ratio. By 15 February 2017, the spectral signature of the water masses in the area of the possible spill was found on the oceanic water and the SST image showed an increase in temperature (> 0.4 °C) in that area. In addition, the "oil/water" coefficient had a maximum value of 3.407 for the central wavelength $\lambda = 0.864.6$ nm, which implies the greater sensitivity of the channel in relation to oil information. Also, when reviewing images from the Sentinel-1B and Sentinel-2A satellites on 3 and 19 February, a plume was observed detaching from the active oil-drilling platform and moving towards the southwest. This work aims to present a series of techniques for the detection of oil spills at sea by using satellite images, in order to develop a monitoring system for the surrounding areas of oil platforms in the Peruvian sea.

KEYWORDS: oil spill detection, SST, spectral signature, satellite imagery

1. INTRODUCCIÓN

En el Perú el desarrollo de la explotación petrolera y las múltiples actividades que de ella se derivan, constituye un permanente riesgo de perturbación del ecosistema marino (JACINTO y CABELLO 1999).

Los conocimientos admitidos en la materia al momento de iniciar el trabajo, indican que *no solo está expuesto a las descargas de diferentes orígenes provenientes de fuentes terrestres, sino que la riqueza petrolífera que alberga y las actividades (exploración, explotación, refinación, transporte) pueden originar un impacto ambiental del entorno. En el norte del Perú, entre Punta Peñitas y los Órganos, se ubican aproximadamente unas 90 plataformas petrolíferas*

1. INTRODUCTION

In Peru, the development of oil exploitation and the multiple activities that arise from it constitute a permanent risk of disruption of the marine ecosystem (JACINTO & CABELLO 1999).

The accepted knowledge on the subject at the start of the work indicates that marine ecosystem is *not only exposed to land-based discharges from different sources but also that the oil wealth it contains and the activities (exploration, exploitation, refining and transport) can cause an environmental impact on the environment. In northern Peru, between Punta Peñitas and Los Órganos, there are approximately 90 oil-drilling platforms in the continental shelf, in*

1 IMARPE, DGIHSA Área de Sensoramiento Remoto. Av. Argentina 2245, Callao, Perú. gvelaochaga@imarpe.gob.pe

en el zócalo continental, en fases de exploración y explotación. Además, en Talara se ubica la principal refinería del Perú (JACINTO et al. 1996).

El área costera de Talara se monitorea desde 1980. Está considerada como un área crítica de contaminación por hidrocarburos aromáticos en sedimentos marinos (31,7 µg/g, abril 1997) (CABELLO y JACINTO 2008).

El 26 de enero del 2017 pobladores y pescadores de la caleta de Cabo Blanco, ubicada en el distrito de Talara, provincia de Piura, reportaron un derrame de petróleo en el mar.

Actualmente la zona donde se ubica el lote Z-2B, se encuentra bajo la modalidad de contrato de explotación con la empresa Savia Perú S.A. (Fuente: www.perupetro.com.pe)

Mediante técnicas de sensoramiento remoto, se busca comprobar si se puede identificar el derrame que ha podido ocasionar contaminación en dicha zona.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio está ubicada en la zona tropical del Pacífico Sudoriental, entre 4°15'00"S - 4°25'00"S y 81°15'00"W - 81°25'00"W (Fig. 1a). Según información proporcionada por PERUPETRO, cerca de esa zona se encuentran pozos activos en la plataforma ubicada en el área delimitada por las coordenadas 4°16'56,05"S y 81°17'54,81"W, a 4,7 kilómetros de la costa (Fig. 1b).

exploration and exploitation phases. In addition, Talara is home to Peru's main refinery (JACINTO et al. 1996).

The coastal area of Talara has been monitored since 1980. It is considered a critical area of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in marine sediments (31.7 µg/g, April 1997) (CABELLO & JACINTO 2008).

On January 26, 2017, residents and fishermen of the Cabo Blanco cove, located in the district of Talara, Piura Region, reported an oil spill at sea.

Currently, the area where the Z-2B lot is located is under an exploitation contract with Savia Perú S.A. (Source: www.perupetro.com.pe)

By means of remote sensing techniques, it is sought to verify if it is possible to identify the spill that may have caused pollution in that area.

2. MATERIAL AND METHODS

The study area is located in the tropical zone of the Southeast Pacific, between 4°15'00"S - 4°25'00"S and 81°15'00"W - 81°25'00"W (Fig. 1a). According to information provided by PERUPETRO, there are active wells near that zone in the platform located in the area delimited by coordinates 4°16'56.05"S and 81°17'54.81"W, at 4.7 kilometers from the coast (Fig. 1b).

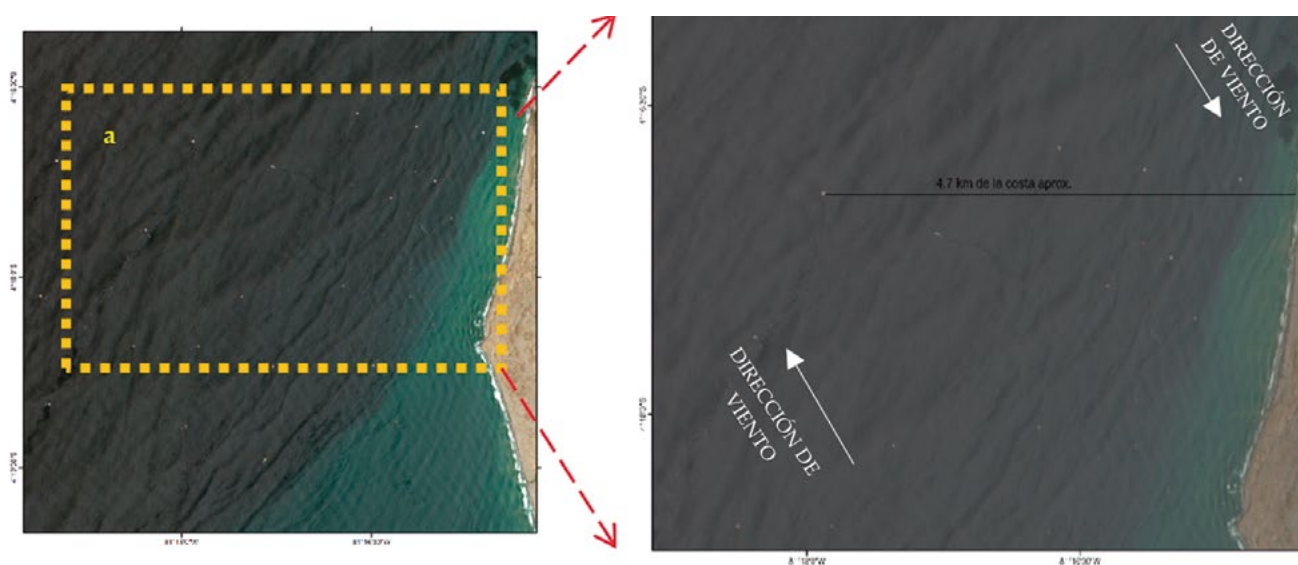


Figura 1.- Imagen Sentinel -2A del 19 de febrero 2017. (a) banda RGB, (b) ubicación de la plataforma

Figure 1. Image from Sentinel -2A of February 19, 2017. (a) RGB band, (b) shelf location

En la Tabla 1 se precisan los pozos que se encuentran en actividad en la plataforma en la que se efectuó el estudio.

Datos satelitales

En la Tabla 2 se describen los nombres de los satélites, la fuente de datos y demás datos que se utilizaron, así como la información del satélite NPP para calibrar la imagen térmica del Satélite Landsat 8.

Table 1 shows the wells that are active on the oil-drilling platform on which the study was carried out.

Satellite data

Table 2 describes the names of the satellites, the data source, and other data that were used, as well as the information from the NPP satellite to calibrate the thermal image of the Landsat 8 satellite.

Tabla1.- Clase, profundidad, periodo de perforación de los pozos activos en la plataforma

Table1.- Class, depth, drilling period of active wells on the shelf

NOMB_POZO NAME_WELL	CLASE_POZO CLASS_WELL	PROF. DEPTH	INIC_PERF. BEGIN_DRILL	TERM_PERF. END_DRILL	LOTE LOT	REGIÓN REGION
PNGR TT 9	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	6056	12/07/1977	02/08/1977	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 7	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	4577	29/11/1977	09/12/1977	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 6	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	5695	11/06/1986	27/06/1986	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 20	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	5050	11/05/1986	01/06/1986	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 19	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	4460	06/11/1977	20/11/1977	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 16	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	5567	13/04/1986	03/05/1986	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 12	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	7132	14/09/1977	21/10/1977	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 11X	EXPLORATORIO EXPLORATORY	6737	02/06/1977	02/07/1977	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 10	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	6504	22/12/1977	16/01/1978	Z-2B	ZOCALO SHELF
PNGR TT 1	DESARROLLO IN DEVELOPMENT	5720	13/08/1977	05/09/1977	Z-2B	ZOCALO SHELF

Fuente: PERUPETRO, vía transparencia
Source: PERUPETRO, transparency

Tabla 2.- Características orbitales y hora de barrido de los satélites

Table 2.- Orbital characteristics and swept time of satellites

Satélite Satellite	Sensor	Fecha y hora de pasada en la zona Date and time of passing in the area	Altitud (km) Altitude (km)	Orbita Orbit	Resolución espacial (m) Spatial resolution (m)	Resolución temporal (días) Time resolution (days)	Resolución Radiométrica Radiometric Resolution	Fuente de datos Data source
Landsat 8	OLI TIRS	15/02/2017 10:33 horas	705	Helio-sincrónica Sun-synchronous	30 100	16	16 bit	NASA & USGS
Landsat 8	OLI	29/12/2016 10:33 horas	705	Helio-sincrónica Sun-synchronous	30	16	16 bit	NASA & USGS
Sentinel 1B	C-SAR	03/02/2017 18:43 horas	693	Polar Helio-sincrónica Sun-synchronous Polar	10	12		Copernicus- ESA
Sentinel 1B	C-SAR	23/11/2016 18:43 horas	693	Polar Helio-sincrónica Sun-synchronous Polar	10	12		Copernicus- ESA
Sentinel 2A	MSI	19/02/2017 10:52 horas	786	Polar Helio-sincrónica Sun-synchronous Polar	10	20	12 bits	Copernicus- ESA
NPP	VIIRS	15/02/2017 13:19 horas	824	Polar Helio-sincrónica Sun-synchronous Polar	1000	1	12 bits	Terascan- IMARPE

SENTINEL 1B

La imagen de Sentinel 1B utilizada en este trabajo es una imagen GRD (*Ground Range Detected*) de nivel 1, la forma de polarizaciones VV (se transmite y se recibe la energía polarizada de manera vertical). Se realizó la corrección geométrica, la calibración radiométrica y la reducción de ruido de la imagen usando el programa SNAP (*Sentinel Application Platform*) desarrollado por la ESA (Agencia Espacial Europea).

Corrección geométrica

Debido a las variaciones topográficas de una escena y la inclinación del sensor del satélite, las distancias se pueden distorsionar en las imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Los datos de la imagen que no están directamente en la ubicación nadir del sensor tendrán cierta distorsión. Las correcciones de terreno están destinadas a compensar esas distorsiones, de modo que la representación geométrica de la imagen sea lo más parecida posible al mundo real.

La corrección geométrica se hizo con la corrección de elipsoide utilizando el método de Grilla de Geolocalización (GG) desarrollado por SMALL & SCHUBERT (2008); aplicando el programa SNAP, se efectuó el remuestreo con el método de "vecino cercano" para lo cual se localizaron los puntos con el sistema mundial de coordenadas WGS84.

Calibración radiométrica

En general, las imágenes de nivel 1 tienen sesgos significativos por no haber realizado la calibración radiométrica. En este trabajo, se calibró la imagen de Sentinel-1B mediante el uso del programa SNAP con el fin de obtener los coeficientes de retrodispersión de la escena de radar.

Reducción del ruido "speckle"

Las imágenes SAR presentan generalmente una serie de píxeles blancos y negros que degradan la calidad de la imagen y hacen que la interpretación de las características sea más difícil. Este moteado (*Speckle*) es causado por la interferencia aleatoria constructiva y destructiva de las ondas de retorno-desfasadas pero coherentes, dispersadas (por los dispersores primarios) dentro de cada celda de resolución. La reducción del ruido *Speckle* se puede aplicar ya sea por filtrado espacial o por procesamiento *multilook*. Se aplicó el filtro Lee refinado para reducción de ruido *Speckle* (LEE & POTTIER 2009).

SENTINEL 1B

The image from Sentinel 1B used in this work is a level 1 GRD (*Ground Range Detected*) image, the form of polarization is VV (the polarized energy is transmitted and received vertically). The geometric correction, radiometric calibration, and noise reduction of the image was performed by using the SNAP (*Sentinel Application Platform*) software developed by the ESA (European Space Agency).

Geometric correction

Due to the topographic variations of a scene and the tilt of the satellite sensor, distances can be distorted in SAR (*Synthetic Aperture Radar*) images. Image data that are not directly at the nadir location of the sensor will have some distortion. Terrain corrections are intended to compensate for these distortions so that the geometric representation of the image is as close as possible to the real world.

The geometric correction was made with ellipsoid correction by means of the Geolocation Grid (GG) method which was developed by SMALL & SCHUBERT (2008); the resampling was carried out with the SNAP software by using the "nearest neighbor" method for which the points were located with the WGS84 world coordinate system.

Radiometric calibration

Overall, level 1 images have significant biases for not having performed radiometric calibration. In this work, the Sentinel-1B image was calibrated by means of the SNAP software in order to obtain the backscatter coefficients of the radar scene.

"Speckle" noise reduction

SAR images generally present a series of black and white pixels that degrade image quality and make interpretation of features more difficult. This speckle is caused by constructive and destructive random interference from the scattered return waves, which are out-of-phase but coherent, within each resolution cell. Speckle noise reduction can be applied either by spatial filtering or by multilook processing. The refined Lee filter was applied for Speckle noise reduction (LEE & POTTIER 2009).

LANDSAT 8

Se realizó la calibración radiométrica y la corrección atmosférica a las imágenes Landsat-8, luego se aplicó una regresión lineal entre la temperatura estimada por las imágenes térmicas de Landsat 8 y la TSM del sensor VIIRS del satélite Suomi NPP (*National Polar-orbiting Partnership*) considerando que los datos de TSM-NPP son validados con los datos *in situ* con el fin de estimar la TSM de Landsat 8 (Fig. 2).

Calibración radiométrica

La imagen Landsat-8 ha sido calibrada radiométricamente usando los coeficientes de calibración almacenados en el cabecero de archivo, de tal forma que el ND de los canales del satélite ha sido convertido a radiancia espectral (L_λ) a través de la ecuación (1).

$$L_\lambda = a \cdot ND + b \quad (1)$$

Donde, ND varía entre 0 y 65535 (16-bits), la radiancia espectral L_λ tiene unidad de $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ y los coeficientes a y b son llamados como ganancia y sesgo reescalados, respectivamente (USGS 2016).

LANDSAT 8

Radiometric calibration and atmospheric correction was performed on the Landsat-8 images, then a linear regression was applied between the temperature estimated by the Landsat 8 thermal images and the SST of the Suomi NPP (*National Polar-orbiting Partnership*) VIIRS sensor considering that the SST-NPP data are validated with *in situ* data in order to estimate the Landsat 8 SST (Fig. 2).

Radiometric calibration

The Landsat-8 image has been radiometrically calibrated by using the calibration coefficients stored in the file header so that the ND of the satellite channels has been converted to spectral radiance (L_λ) through the equation (1):

$$L_\lambda = a \cdot ND + b \quad (1)$$

Where ND varies between 0 and 65535 (16-bits), the spectral radiance L_λ has a unit of $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ and the coefficients a and b are called as rescaled gain and bias, respectively (USGS 2016).

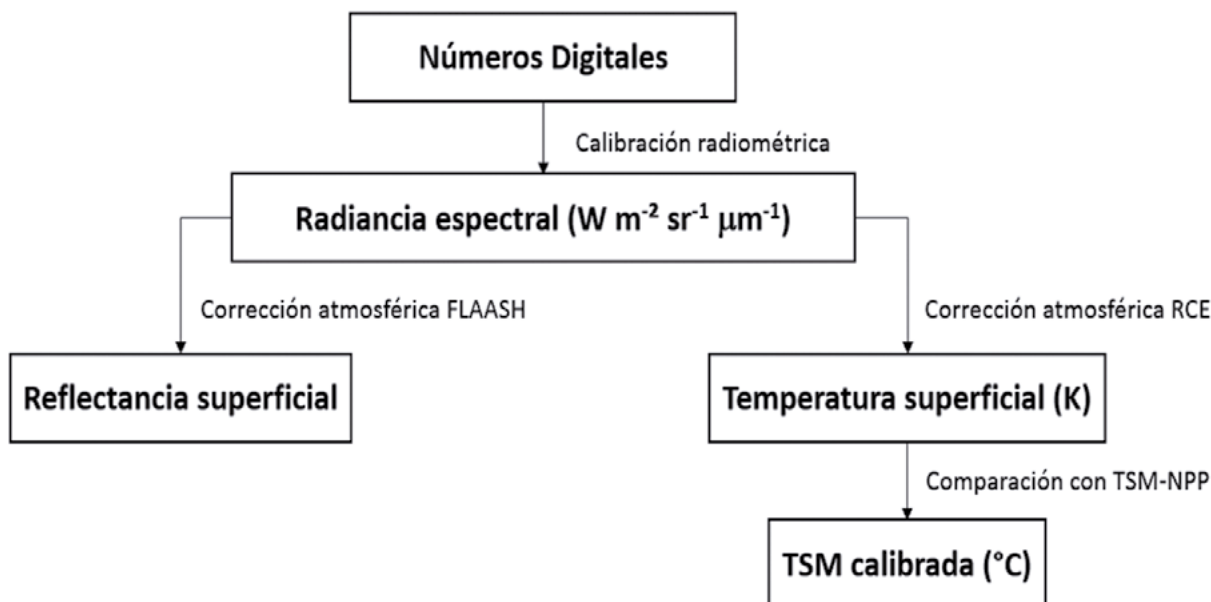


Figura 2.- Diagrama de flujo del procesamiento de imágenes Landsat 8

Figure 2. Landsat 8 image processing flowchart

Corrección atmosférica

Se han estimado los valores de la reflectancia en la superficie de la Tierra para cada píxel de los canales visibles e infrarrojo cercanos del sensor OLI, con longitud de onda central de 0,443 μm, 0,4826 μm, 0,5613 μm, 0,6546 μm y 0,8646 μm, a través del modelo de la corrección atmosférico FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) expresado por la ecuación (2) (MATTHEW *et al.* 2003).

$$L_{\lambda} = \frac{A \cdot \rho}{1 - \rho_e \cdot S} + \frac{B \cdot \rho_e}{1 - \rho_e \cdot S} + L_a, \tag{2}$$

Donde, ρ es la reflectancia del píxel, ρ_e es la reflectancia promedio del píxel y los pixeles vecinos, S es el albedo esférico de la atmósfera, A y B son los coeficientes de ajuste que dependen de las condiciones atmosféricas y la geometría del sensor, L_a es la radiancia que corresponde a la dispersión de la atmósfera. Los valores de S, A, B y L_a están en función de los ángulos cenit y azimut del Sol y de la visión, de la elevación promedio del área de estudio, y de la concentración de las moléculas de los gases y de los aerosoles (ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS 2009).

Para el cálculo de temperatura, los valores de radiancia de los canales térmicos (λ= 10,9 μm y 12,0 μm) del sensor TIRS han sido convertidos a radiancia del objeto en la superficie de la Tierra aplicando el método de RCE (*Reference Channel Emissivity*) expresado por la ecuación (3):

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} [\varepsilon_{\lambda} B(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\downarrow}] + L_{\uparrow}, \tag{3}$$

Donde, τ_λ es la transmisividad atmosférica espectral, ε_λ es la emitancia superficial del objeto, para el petróleo crudo el rango está entre 0,94-0,97 (XING *et al.* 2015), B(T_s) es la radiancia espectral emitida por un cuerpo negro con temperatura superficial T_s, L_↑ es la radiancia emitida por la atmósfera hacia al sensor, L_↓ es la radiancia emitida por la atmósfera hacia al suelo, reflejada por él y registrada por el sensor (BARSÌ *et al.* 2003).

Para la estimación de temperatura superficial de la Tierra se usó la ecuación (4).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1\right)}, \tag{4}$$

Atmospheric correction

The reflectance values on the Earth’s surface have been estimated for each pixel of the visible and near-infrared channels of the OLI sensor, with central wavelengths of 0.443 μm, 0.4826 μm, 0.5613 μm, 0.6546 μm, and 0.8646 μm, through the FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) atmospheric correction model expressed by the equation (2) (MATTHEW *et al.* 2003):

$$L_{\lambda} = \frac{A \cdot \rho}{1 - \rho_e \cdot S} + \frac{B \cdot \rho_e}{1 - \rho_e \cdot S} + L_a, \tag{2}$$

Where ρ is the reflectance of the pixel, ρ_e is the median reflectance of the pixel and neighboring pixels, S is the spherical albedo of the atmosphere, A and B are the adjustment coefficients that depend on atmospheric conditions and sensor geometry, L_a is the radiance that corresponds to the dispersion of the atmosphere. The values of S, A, B, and L_a are a function of the zenith and azimuth angles of the Sun and the vision, the mean elevation of the study area, and the concentration of the molecules of gases and aerosols (ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS 2009).

For the temperature estimation, the radiance values of the thermal channels (λ= 10.9 μm and 12.0 μm) of the TIRS sensor have been converted to the radiance of the object on the Earth’s surface by applying the RCE method (*Reference Channel Emissivity*) expressed by the equation (3):

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} [\varepsilon_{\lambda} B(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\downarrow}] + L_{\uparrow}, \tag{3}$$

Where τ_λ is the spectral atmospheric transmissivity, ε_λ is the object’s surface emittance, for crude oil the range is between 0.94-0.97 (XING *et al.* 2015), B(T_s) is the spectral radiance emitted by a black body with surface temperature T_s, L_↑ is the radiance emitted by the atmosphere towards the sensor, L_↓ is the radiance emitted by the atmosphere towards the ground, reflected by it and recorded by the sensor (BARSÌ *et al.* 2003).

For the estimation of the Earth’s surface temperature the following equation was used (4):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1\right)}, \tag{4}$$

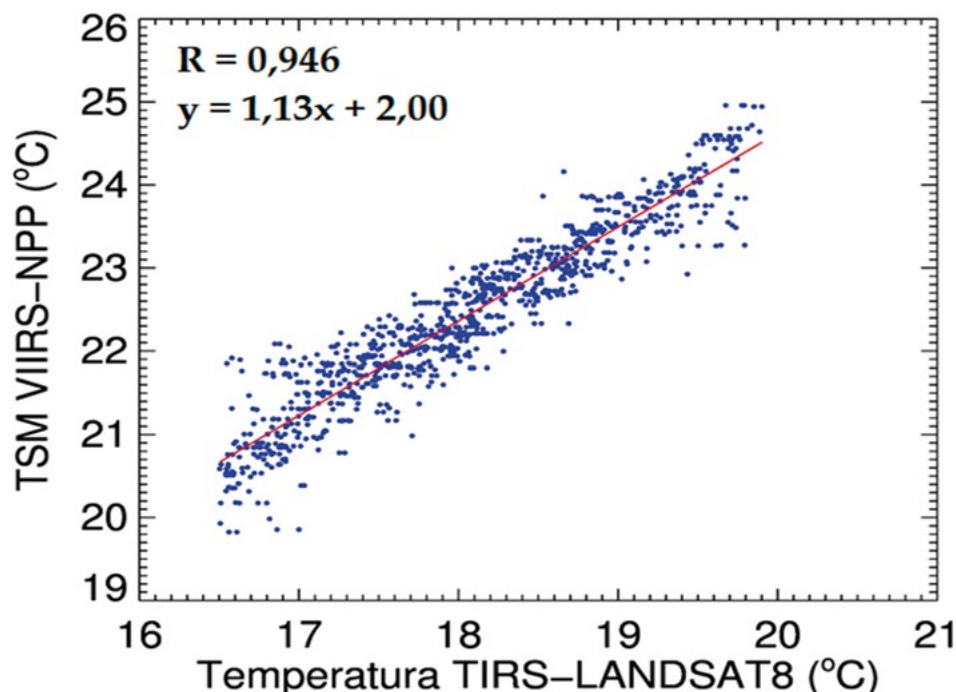


Figura 3.- Regresión lineal entre los valores T_s estimados por el sensor TIRS-L8 y los productos TSM VIIRS-NPP

Figure 3. Linear regression between the T_s values estimated by the TIRS-L8 sensor and the VIIRS-NPP SST products

Donde, T_s es la temperatura superficial de la Tierra en grados Kelvin; para convertir a grado Celsius, se debe restar 273,15 al valor de T_s . K_1 y K_2 son los coeficientes de conversión térmica que se encuentran en el archivo cabecero (BABU & FLEMING 2008).

Estimación de temperatura superficial del mar

Se han comparado los valores de T_s con los datos productos de TSM estimados del sensor VIIRS del satélite Suomi NPP con el fin de ajustar la TSM del Landsat-8. La figura 3 muestra la relación lineal ($R = 0,946$) entre la T_s de Landsat 8 y TSM de NPP para el día 29 de diciembre de 2016. Se ha estimado la TSM con los coeficientes de ajuste de la ecuación lineal para cada una de las imágenes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS DE LA FIRMA ESPECTRAL

Las estaciones tomadas de la imagen de reflectancia superficial obtenida a través de la corrección atmosférica FLAASH, corresponden a los cuerpos de agua caracterizados como: a) agua de muy alta concentración de sedimento;

Where T_s is the Earth's surface temperature in Kelvin degrees; in order to convert it to Celsius degrees, 273.15 must be subtracted from the T_s value. K_1 and K_2 are the thermal conversion coefficients found in the header file (BABU & FLEMING 2008).

Estimation of sea surface temperature

The T_s values have been compared with the estimated SST product data from the Suomi NPP VIIRS sensor in order to adjust the Landsat-8 SST. Figure 3 shows the linear relationship ($R = 0.946$) between the Landsat 8 T_s and NPP SST for 29 December 2016. The SST has been estimated with the adjustment coefficients of the linear equation for each of the images.

3. RESULTS AND DISCUSSION

SPECTRAL SIGNATURE ANALYSIS

The stations taken from the surface reflectance image obtained through the FLAASH atmospheric correction correspond to water masses which are characterized as: a) water with a very high sediment concentration; b)

b) agua de alta concentración de sedimento; c) agua de concentración moderada de sedimento; d) agua oceánica; e) posible derrame de petróleo. La figura 4a muestra las siete estaciones en las que se extrajeron los valores de reflectancia, en las estaciones 1-3 se ubican los cuerpos de agua con sedimentos, las estaciones (7) y (6) representan valores de reflectancia TOA (*Top Of the Atmosphere*, antes de aplicar FLAASH), y las estaciones 4 y 5 son reflectancias superficiales (después de aplicar FLAASH) para los puntos d y e, respectivamente.

En la figura 4b se muestra que, para las aguas de mezcla de sedimentos (puntos a-c) el pico de mayor reflectancia se encontró en $\lambda = 561,3$ nm y el valor mínimo en $\lambda = 864,6$ nm, la reflectancia es mayor cuando la concentración de sedimentos es más alto en rango de longitud de onda entre 400 y 900 nm; mientras que las firmas espectrales TOA de las aguas oceánicas (punto d) y de la zona de posible derrame (punto e) disminuyeron su valor con respecto a la longitud de onda, donde el valor de la reflectancia de ambas zonas disminuyó de 0,13 a 0,02 aproximadamente (firmas 6 y 7) desde $\lambda = 443$ nm hasta $\lambda = 864,6$ nm mientras que la disminución del valor de reflectancia superficial es menor (de 0,05 a 0,01) como se observa en las estaciones 4 y 5.

Las firmas espectrales de los puntos 1-5 coinciden con lo escrito en el reporte de IOCCG (*International Ocean-Colour Coordinating Group*) en 2000. Esto implica que el modelo FLAASH ajusta mejor los valores de reflectancia con los datos *in situ* en dicho reporte y permite que los píxeles de la imagen representen las propiedades ópticas de los cuerpos de agua con mayor exactitud.

Comparando la firma espectral de reflectancia de los puntos d y e, se observó que la firma de zona de posible derrame (firma 5) está ligeramente por encima de la del agua oceánica (firma 4), y para la reflectancia TOA la firma 6 (posible derrame) está por encima de la firma 7 (agua oceánica), este comportamiento también lo observó FINGAS en 2015 (Fig. 4c).

water with a high sediment concentration; c) water with a moderate sediment concentration; d) oceanic water; e) possible oil spill. Figure 4a shows the seven stations where reflectance values were extracted; stations 1-3 are located in water masses with sediments (points a, b, and c), stations (7) and (6) represent TOA reflectance values (*Top Of the Atmosphere*, before applying FLAASH), and stations 4 and 5 are surface reflectances (after applying FLAASH) for points d and e, respectively.

Figure 4b shows that, for sediment mixing waters (a – c points), the peak with the highest reflectance was found at $\lambda = 561.3$ nm and the minimum value at $\lambda = 864.6$ nm, the reflectance is higher when the concentration of sediments is higher in the wavelength range between 400 and 900 nm, while the TOA spectral signatures of oceanic waters (point d) and of the zone of possible spillage (point e), decreased their value in relation to the wavelength, where the value of the reflectance of both areas decreased from approximately 0.13 to 0.02 (signatures 6 and 7) from $\lambda = 443$ nm to $\lambda = 864.6$ nm while the decrease of the surface reflectance value is less (from 0.05 to 0.01) as observed in stations 4 and 5.

The spectral signatures of points 1-5 coincide with what was written in the IOCCG (*International Ocean-Colour Coordinating Group*) report in 2000. This implies that the FLAASH model better matches the reflectance values with the *in situ* data in that report and allows the pixels in the image to represent the optical properties of water masses with greater accuracy.

When comparing the spectral reflectance signature of points d and e, it was observed that the signature of the area of possible spill (signature 5) is slightly above that of oceanic water (signature 4), and for the TOA reflectance the signature 6 (possible spill) is above the signature 7 (oceanic water), this behavior was also observed by FINGAS in 2015 (Fig. 4c).

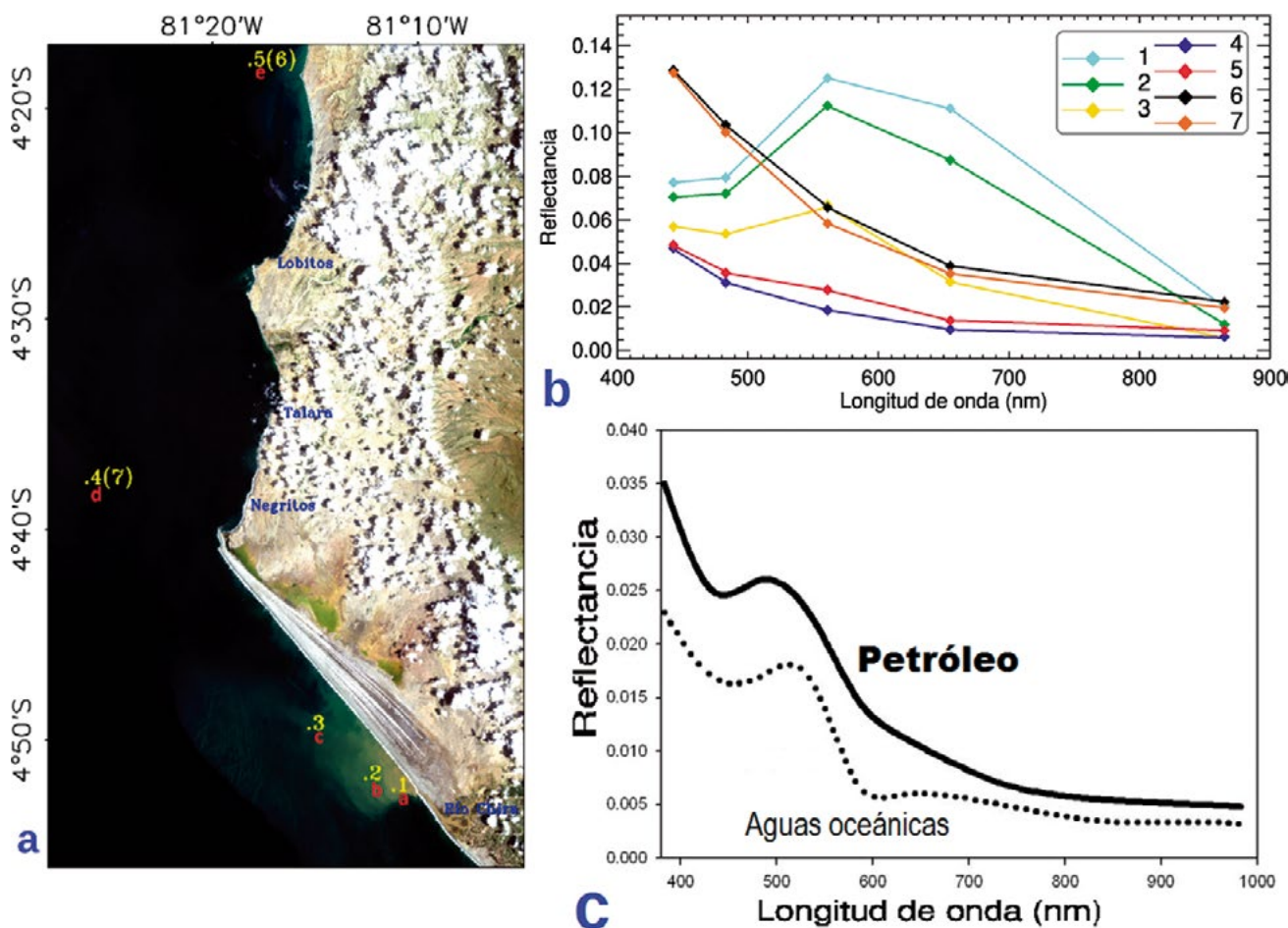


Figura 4.- (a) Estaciones en la imagen RGB-Landsat corresponden a distintos cuerpos de agua, (b) firma espectral de las estaciones, (c) firma espectral del petróleo y de las aguas oceánicas, adaptado de FINGAS 2015

Figure 4. (a) Stations in the RGB-Landsat image correspond to different water masses, (b) spectral signature of stations, (c) spectral signature of oil and ocean waters, adapted from FINGAS 2015

RAZÓN PETRÓLEO/AGUA

JIANG & ZHAO (2011) utilizaron la razón entre petróleo/agua en un estudio de detección de derrame de petróleo ocurrido en el Golfo de México en 2010. Cuanto mayor sea el factor es más fácil para identificar el derrame. El factor C_{ρ} se obtuvo con la ecuación (5).

$$C_{\rho} = \frac{\rho_{\text{petróleo}} - \rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}}, \quad (5)$$

Donde, $\rho_{\text{petróleo}}$ y ρ_{agua} son los promedios de la reflectancia espectral de los pixeles de la capa de petróleo y el agua del fondo, respectivamente. A través del modelo FLAASH, se han eliminado los efectos atmosféricos generados por las moléculas de los gases y los aerosoles, y se observó un incremento de C_{ρ} para los canales visibles e infrarrojo cercano, el C_{ρ} máximo es 3,407 para $\lambda = 0,8646 \mu\text{m}$ implicando la mayor sensibilidad del canal con respecto a la

OIL/WATER RATIO (OWR)

JIANG & ZHAO (2011) used the oil/water ratio in an oil spill detection study carried out in the Gulf of Mexico in 2010. The higher the factor, the easier it is to identify the spill. The C_{ρ} factor is obtained with the equation (5):

$$C_{\rho} = \frac{\rho_{\text{petróleo}} - \rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}}, \quad (5)$$

Where $\rho_{\text{petróleo}}$ and ρ_{agua} are the averages of the pixels' spectral reflectance of the oil layer and the water of the bottom, respectively. Through the FLAASH model, the atmospheric effects generated by the molecules of gases and aerosols have been eliminated, and an increase of C_{ρ} was observed for the visible channels and near infrared, the maximum C_{ρ} is 3.407 for $\lambda = 0.8646 \mu\text{m}$ which implies the greater sensitivity of the channel regarding the oil information

información de petróleo (Fig. 5). Este resultado coincide con el trabajo de JIANG & ZHAO (2011) en el cual se obtuvo mayor C_o para el canal de $\lambda = 0,865 \mu\text{m}$ de la imagen MERISI-FY3A.

ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA

La imagen TSM de Landsat 8 muestra que para el 29 de diciembre del 2016, la TSM de la zona frente a Talara varió entre 22,5 y 25 °C, las masas de aguas calientes estaban distribuidas en las altitudes altas y la parte costera, no se observó ninguna variación progresiva alrededor de la plataforma petrolera (Fig. 6a). Para el 15 de febrero del 2017, se observó una distribución de TSM altas (28,3-28,4 °C) a lo largo de la trayectoria del posible derrame mientras que las temperaturas alejadas de la zona de influencia estuvieron entre 27,7 y 28,1 °C (Fig. 6b). XING *et al.* (2015) indicaron que el petróleo generalmente absorbe el calor durante el día y se calienta más que el agua de mar circundante, lo que lo hace mostrar como manchas calientes en las imágenes térmicas. El momento de barrido de ambas imágenes es a las 10:33 a. m. (hora local), se observa que el evento ocurrido en el día 15 de febrero tiene un comportamiento similar a lo que explicaron XING *et al.* (2015).

Satélite activo – Sentinel-1B

La imagen Sentinel 1B para el 23 de noviembre del 2016 (Fig. 7a) muestra a las plataformas como pequeños puntos blancos, no se observa ninguna anomalía cerca de la plataforma activa señalada. En la imagen del 3 de febrero del 2017 (Fig. 7b) se

(Fig. 5). This result coincides with Jiang’s work in which greater C_o was obtained for the λ channel = 0.865 μm of the MERISI-FY3A image (JIANG & ZHAO 2011).

TEMPERATURE ANALYSIS

The Landsat 8 SST image shows that by 29 December 2016, the SST of the area off Talara ranged between 22.5 and 25 °C, the hot water masses were distributed at high altitudes and in the coastal part, no progressive variation was observed around the oil-drilling platform (Fig. 6a). By 15 February 2017, a distribution of high SSTs (28.3-28.4 °C) was observed along the trajectory of the possible spill while temperatures away from the area of influence were between 27.7 and 28.1 °C (Fig. 6b). XING *et al.* (2015) indicated that oil generally absorbs heat during the day and warms up more than the surrounding seawater, which makes it appear as hot spots in thermal imagery. The swept time for both images is 10:33 a.m. (local time), it is observed that the event occurred on 15 February has a behavior similar to that explained by XING *et al.* (2015).

Active satellite – Sentinel-1B

The Sentinel 1B image for 23 November 2016 (Fig. 7a) shows the oil-drilling platforms as small white dots, no abnormality is observed near the indicated active platform. In the image of 3 February 2017 (Fig. 7b) a dark

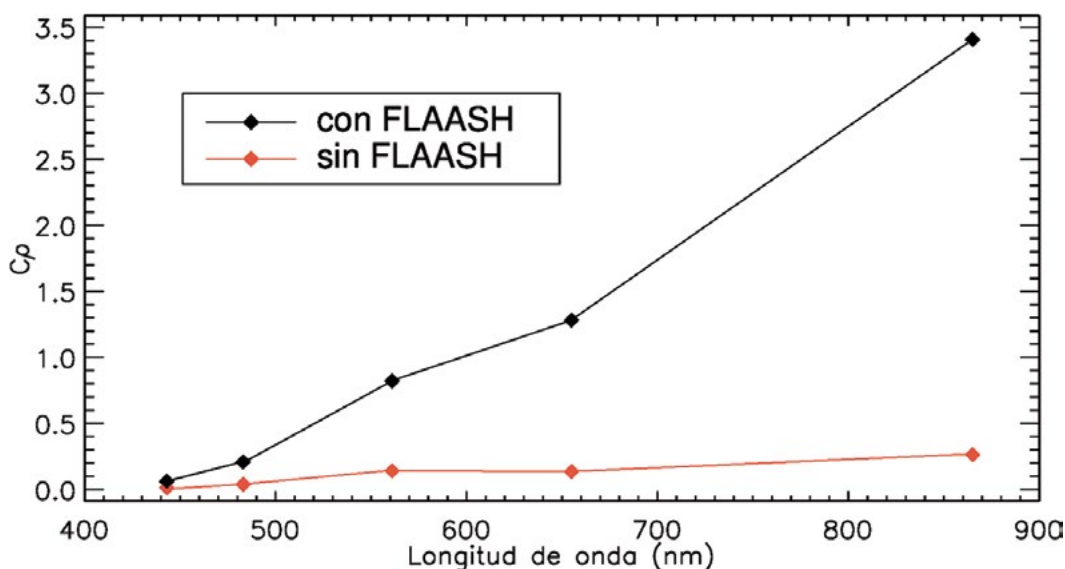


Figura 5.- Comparación de C_q antes y después de la corrección atmosférica FLAASH

Figure 5. Comparison of C_q before and after the FLAASH atmospheric correction

visualiza una línea oscura que se desprende a partir de la plataforma de petróleo activa y que alcanza una extensión de hasta 10 km; la fecha coincide con la anomalía presente en la misma plataforma para los otros dos satélites.

line detached from the active oil platform and reaching an extension of up to 10 km is displayed; the date coincides with the abnormality present on the same platform for the other two satellites.

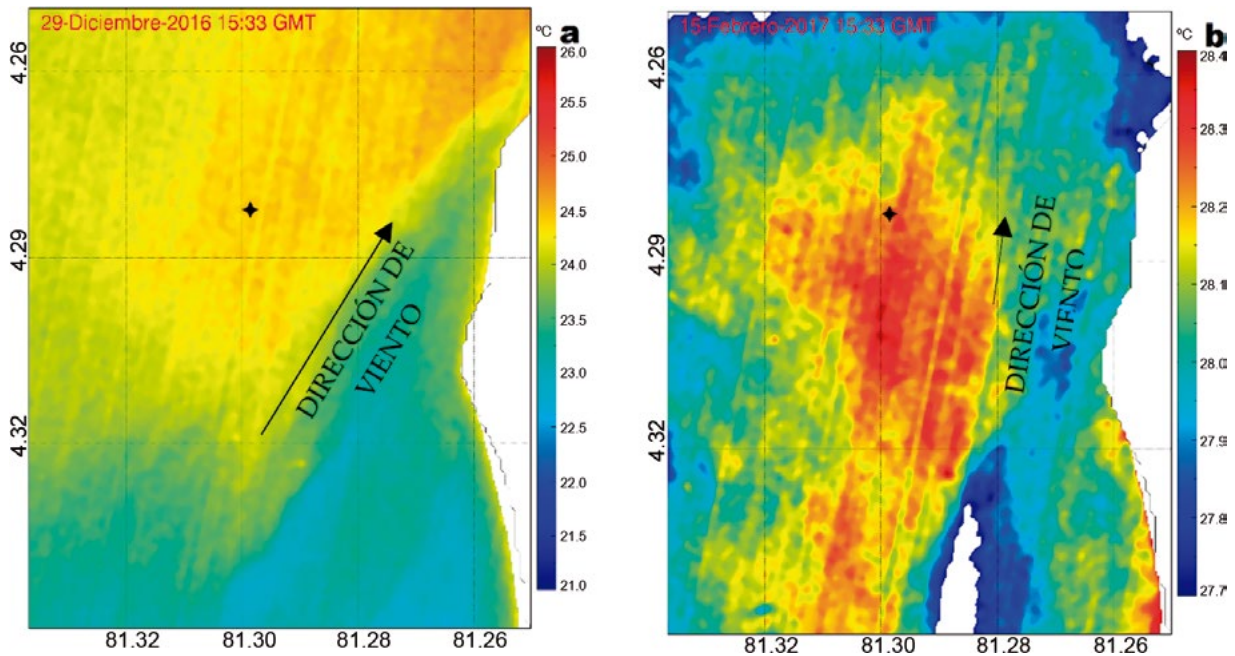


Figura 6.- TSM de Landsat-8 para la fecha (a) 29 de diciembre de 2016 y (b) 15 de Febrero de 2017

Figure 6. Landsat-8 SST for the date (a) 29 December 2016 and (b) 15 February 2017

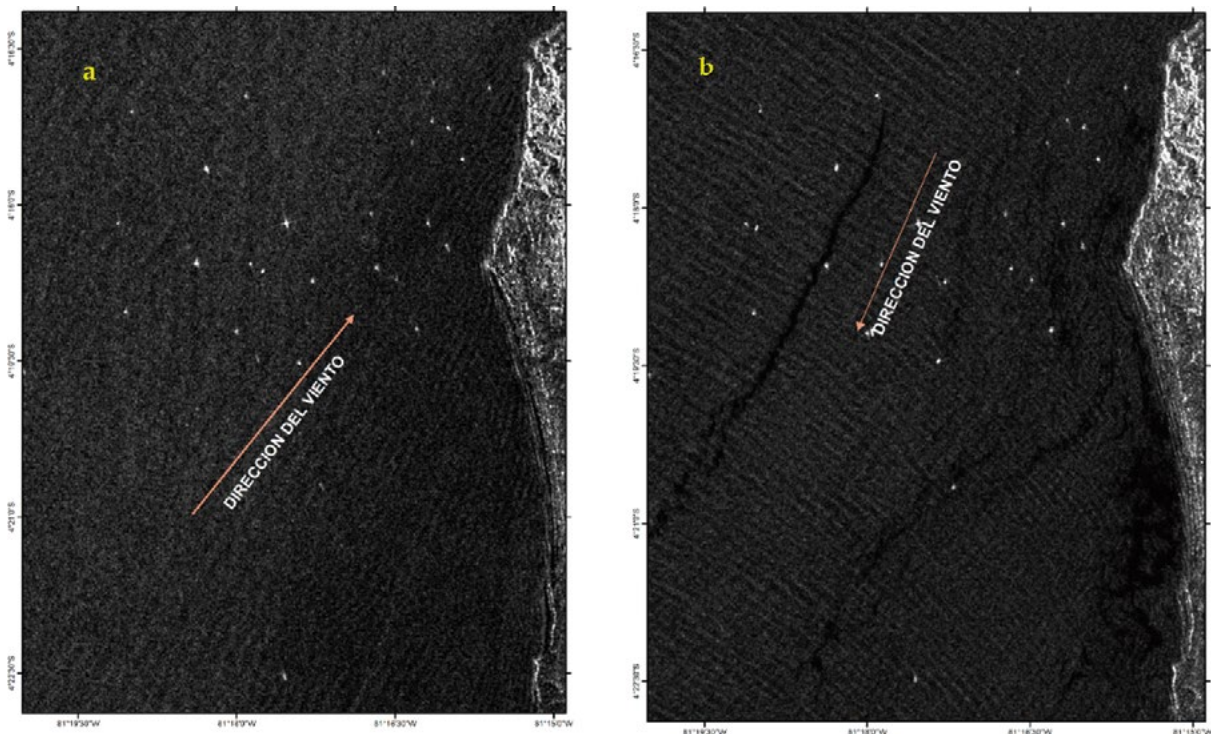


Figura 7.- Sentinel-1B para la fecha 23 de noviembre del 2016 donde no se observa el evento (a) 3 de febrero del 2017, las zonas oscuras cercanas a la costa son zonas con vientos débiles (b)

Figure 7. Sentinel-1B images for 23 November 2016 where no event is observed (a); 3 February 2017, dark areas near to the coast are zones with weak winds (b)

4. CONCLUSIONES

Se pudo identificar los cuerpos de agua usando la firma espectral de reflectancia del satélite Landsat 8 para el día 15 de febrero del 2017, donde, la zona de posible derrame está por encima de la de aguas oceánicas (limpias), comportamiento similar a lo reportado por FINGAS (2015).

El canal de longitud de onda central de 0,8646 μm es más sensible con respecto a la información de petróleo.

Utilizando la banda térmica del satélite Landsat 8 se calculó que la TSM de la zona de posible derrame es 0,4 $^{\circ}\text{C}$ más alta (28,3-28,4 $^{\circ}\text{C}$) que las zonas vecinas en el día para 15 de febrero de 2017.

Con los satélites Sentinel 1 y Sentinel 2 en los días 3 y 19 de febrero, respectivamente, se observó una pluma desprendida desde la plataforma activa y que se desplaza hacia el suroeste.

Utilizando las distintas técnicas para la detección de petróleo en el mar, se ha podido identificar un posible derrame en la plataforma activa ubicada en la zona marítima de Talara, comprobando la utilidad de las herramientas satélites.

4. CONCLUSIONS

The water masses could be identified by using the reflectance spectral signature of the Landsat 8 satellite for 15 February 2017, where the area of possible spill is above that of oceanic (clean) waters, behavior similar to that reported by FINGAS (2015).

The central wavelength channel of 0.8646 μm is more sensitive to oil information.

By using the Landsat 8 satellite thermal band, the SST of the area of possible spill was estimated to be 0.4 $^{\circ}\text{C}$ higher (28.3-28.4 $^{\circ}\text{C}$) than neighboring areas on the day by 15 February 2017.

A plume detached from the active platform and moving towards the southwest was observed with the Sentinel 1 and Sentinel 2 satellites on 3 and 19 February, respectively.

By applying the different techniques for the detection of oil at sea, it has been possible to identify a possible spill in the active oil-drilling platform located in the maritime zone of Talara, thus verifying the usefulness of the satellite tools.

5. REFERENCIAS / REFERENCES

- BABU G K, FLEMING K. 2008. Surface Temperature Estimation from Landsat ETM+ Data for a part of the Baspa Basin, NW Himalaya, India. *Bulletin of Glaciological Research*. 25: 19 - 26.
- BARSI J A, BARKE J L, SCHOTT J R. 2003. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument. *IEEE. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS03 Cat. No.03CH37477*: 21-25.
- CABELLO R J, JACINTO M E. 2008. Evaluación Ambiental en Zonas Marino Costeras del Perú. 2002, 2003 y 2004. *Inf Inst Mar Perú*. 35(1): 65 - 74.
- FINGAS M. 2015. *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. John Wiley & Sons Inc. 1. 693.
- ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. 2009. Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide. ITT Corporation. 20AC47DOC. 44.
- JACINTO M E, CABELLO R J. 1999. Niveles de Hidrocarburos de Petróleo en el Ecosistema Marino Costero del Perú. Bahías seleccionadas. Periodo 1996. *Inf Prog Inst Mar Perú*. 110: 60 pp.
- JACINTO M E, CHÁVEZ J H, MARTÍNEZ C G, GUZMÁN M R. 1996. Evaluación de la Calidad del Medio Marino en la Bahía de Talara. *Inf Prog Inst Mar Perú*. 41: 19 - 35.
- JIANG Q F, ZHAO C F. 2011. The Improvement of Oil Spill Detection by Atmospheric Correction of FY-3A/MERSI Data. *Transactions of Oceanology and Limnology*. 4: 16 - 24.
- LEE J, POTTIER E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Boca Raton: CRC Press. 422 pp.
- MATTHEW M W, ADLER-GOLDEN S M, BERK A, FELDE G, ANDERSON G P, GORODETZKY D, PASWATERS S, SHIPPERT M. 2003. Atmospheric Correction of Spectral Imagery: Evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data. *SPIE Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX*. 5093. 474 - 482 pp.
- SMALL D, SCHUBERT A. 2008. *Guide to ASAR Geocoding*. Remote Sensing Laboratories - University of Zurich. Issue: 1.01: 36 pp.
- USGS (United States Geological Survey). 2016. *Landsat 8(L8) Data Users Handbook*. LSDS-1574. 2. 106.
- XING Q G, LI L, LOU M J, BING L, ZHAO R X, LI Z B. 2015. Observation of Oil Spills through Landsat Thermal Infrared Imagery: A Case of Deepwater Horizon. *Aquatic Procedia*. 3: 151 - 156.