

MAPEO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA MACROALGA *Lessonia nigrescens* USANDO IMÁGENES DE SATÉLITE SPOT -6 EN LA REGIÓN MOQUEGUA

MAPPING OF THE DISTRIBUTION OF *Lessonia nigrescens* THROUGH SPOT-6 SATELLITE IMAGES IN THE MOQUEGUA REGION

Luis Escudero¹ Han Xu¹ Jaime Atiquipa¹ German Velaochaga¹

RESUMEN

ESCUADERO L, XU H, ATIQUIPA J, VELAACHAGA G. 2020. Mapeo de la distribución de la macroalga *Lessonia nigrescens* usando imágenes de satélite SPOT-6 en la Región Moquegua. *Bol Inst Mar Perú*. 35(2): 257-270.- Usando imágenes submétricas (SPOT-6) y realizando observaciones *in situ* se desarrolló el mapeo de la distribución de la macroalga *Lessonia nigrescens* en la Región Moquegua. La imagen SPOT-6 corresponde al 28 de setiembre 2018. Se realizó el preprocesamiento de los datos del satélite (calibración radiométrica y corrección atmosférica usando el modelo QUAC) para obtener la reflectancia espectral para los tres canales visibles. A través del modelo de clasificación supervisada SVM se distinguieron los objetos que tienen característica espectral similar, tales como macroalgas, rocas, sombra y agua. Se estimó un área total de $3,777 \times 10^4$ m² de *L. nigrescens* a lo largo de la costa de Moquegua, donde el 80% de la distribución se encuentra a partir de Jaboncillo hacia al norte en ambientes del intermareal rocoso en forma de franjas. El área estimada de *L. nigrescens* por este trabajo fue 38,5% menor al comparar con los resultados de la evaluación de la misma especie por los investigadores del laboratorio costero de Ilo-IMARPE en 2014. Mediante el análisis del perfil latitudinal y al comparar los datos satelitales con lo observado se determinó la poca variabilidad espacial de la distribución de las macroalgas que se concentran en la zona los Platanales.

PALABRAS CLAVE: *Lessonia nigrescens*, SPOT-6, clasificación supervisada

ABSTRACT

ESCUADERO L, XU H, ATIQUIPA J, VELAACHAGA G. 2020. Mapping of the distribution of *Lessonia nigrescens* through SPOT-6 satellite images in the Moquegua Region. *Bol Inst Mar Peru*. 35(2): 257-270.- We developed the mapping of the distribution of the *Lessonia nigrescens* macroalgae in the Moquegua Region through sub metric imaging (SPOT-6) and *in situ* observations. The SPOT-6 image is dated September 28, 2018. The satellite data was pre-processed (radiometric calibration and atmospheric correction using the QUAC model) to obtain the spectral reflectance for the three visible channels. We used the supervised learning model SVM to distinguish the objects that have similar spectral characteristics, such as macroalgae, rocks, shade, and water. We estimated a total area of $3,777 \times 10^4$ m² of *L. nigrescens* along the coast of Moquegua, where 80% of the distribution is found from Jaboncillo to the north, in rocky intertidal environments forming strips. In this work, the estimated area of *L. nigrescens* was 38.5% less when compared with the results of the evaluation carried out in 2014. We determined the low spatial variability of the distribution of macroalgae concentrated in the area of Platanales by analyzing the latitudinal profile and comparing satellite data with what was observed.

KEYWORDS: *Lessonia nigrescens*, SPOT-6, supervised classification

1. INTRODUCCIÓN

La macroalga parda *Lessonia nigrescens* Villouta & Santelices, 1986, conocida como "aracanto" en el Perú, tiene una distribución en forma de praderas o cinturones densos en las zonas intermareal y submareal somera, principalmente en las zonas centro y sur; en la Región de Moquegua se le encuentra desde Yerbabuena hasta Jaboncillo y desde Media Luna hasta Corralitos en cinturones de menor amplitud, en áreas de roquería y pequeños mocheríos (IMARPE- ILO, 2010).

1. INTRODUCTION

The giant grey weed *Lessonia nigrescens* Villouta & Santelices, 1986, known as *aracanto* in Peru is distributed as meadows or dense belts in the intertidal and shallow subtidal zones, mainly in the central and southern areas. In the Moquegua Region, it is found from Yerbabuena to Jaboncillo and from Media Luna to Corralitos in smaller belts, in rocky areas, and small *mocherios* (submerged rock formations) (IMARPE- ILO, 2010).

¹ IMARPE, Área Funcional de Sensoramiento Remoto (DGIHSA). Av. Argentina 2245, Callao, Perú.
lescudero@imarpe.gob.pe

Desde años anteriores el IMARPE viene realizando evaluaciones de poblaciones de macroalgas especialmente en la zona sur del Perú (IMARPE-ILO, 2014), debido a su importancia económica, social y ecológica (VÁSQUEZ, 2009).

De acuerdo a los resultados de evaluaciones de este recurso, en el año 2014 en la Región Moquegua se estimó un área total de $6,145 \times 10^4$ m² entre Yerbabuena-Pocoma y $2,486 \times 10^4$ m² entre Boca del Río-Cuartel, que constituyen las dos principales zonas de producción (IMARPE-ILO, 2014). En IMARPE se elaboró el protocolo para evaluación poblacional de *L. trabeculata*, definiéndose trece sectores (treinta subsectores) de trabajo para la evaluación en los litorales de Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna con el fin de obtener la mayor accesibilidad y aprovechamiento por parte de las organizaciones pesqueras artesanales (TEJADA *et al.*, 2019).

En este trabajo se cartografía la distribución superficial de la macroalga *L. nigrescens* en la Región Moquegua, usando imágenes de satélite submétricas SPOT-6 de alta resolución espacial (1,5 m x 1,5 m). Debido a las propiedades bioquímicas de composición de las algas pardas que presentan, generalmente, mayor absorción en las frecuencias correspondientes a los colores azul y rojo y por lo tanto mayor reflectancia en las otras frecuencias del espectro electromagnético, que pueden ser detectadas por los sensores de los satélites desde el espacio, se han desarrollado diversas investigaciones utilizando las imágenes satélites de media y alta resolución espacial para el mapeo de las algas marinas (GOWER *et al.*, 2006; HU, 2009; HOSSAIN *et al.*, 2014; HU *et al.*, 2015).

Una de las principales dificultades al desarrollar esta labor fue no contar con una “biblioteca” de firmas espectrales que permitan la identificación de esta especie, debido a que son muy pocos los estudios realizados a nivel mundial (KUTSER *et al.*, 2006), lo que motivó desarrollar este trabajo.

Por otro lado, el uso de métodos tradicionales de estudios de campo, proporcionan gran precisión y alta resolución; sin embargo, sus costos son elevados y se ven limitados por el tiempo y número de personas necesarias. Es por eso que en los últimos años los estudios científicos en este campo combinan estos métodos con información de imágenes de satélite, las cuales permiten cubrir áreas más extensas, obtener datos con mayor frecuencia y retrospectivamente.

IMARPE has been conducting macroalgae population assessments since previous years, especially in southern Peru (IMARPE-ILO, 2014), given its economic, social, and ecological importance (VÁSQUEZ, 2009).

Based on previous assessments, in 2014, it was estimated that in the Moquegua Region, a total area of $6,145 \times 10^4$ m² of giant gray weed between Yerbabuena-Pocoma and $2,486 \times 10^4$ m² between Boca del Río-Cuartel, which are the two main production areas (IMARPE-ILO, 2014). IMARPE prepared a protocol for the population assessment of *L. trabeculata*, defining thirteen sectors (thirty subsectors) for the evaluation along the coasts of Ica, Arequipa, Moquegua, and Tacna to ensure greater accessibility and use by artisanal fisheries organizations (TEJADA *et al.*, 2019).

In this work, we mapped the surface distribution of *L. nigrescens* in the Moquegua Region through SPOT-6 sub metric satellite images of high spatial resolution (1.5 m x 1.5 m). Several studies have been developed using medium and high-resolution satellite images for the mapping of marine algae, due to the biochemical properties of the brown algae composition, which generally present higher absorption in the frequencies corresponding to the blue and red colors and therefore higher reflectance in the other frequencies of the electromagnetic spectrum, which can be detected by satellite sensors from space (GOWER *et al.*, 2006; HU, 2009; HOSSAIN *et al.*, 2014; HU *et al.*, 2015).

The lack of a “library” of spectral signatures that would allow the identification of this species was one of the main difficulties when developing this work since very few studies have been carried out worldwide (KUTSER *et al.*, 2006). This motivated the development of this work.

On the other hand, the use of traditional methods of field studies, provide great accuracy and high resolution. However, their costs are high and are limited by the time and number of people needed. Therefore, recently, scientific studies in this field combine these methods with information from satellite images, which allow covering larger areas, obtaining data more frequently and retrospectively.

Así mismo, se realizaron observaciones *in situ* utilizando las guías de recolección y reconocimiento de algas pardas comerciales en el Perú (CARBAJAL y GAMARRA, 2018).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio comprendió desde el puerto de Ilo (17°20'42,8"S) hasta Platanales (17°23'14,7"S) en la Región Moquegua (Fig. 1). La elección de la zona se determinó con base en las evaluaciones que el IMARPE-Ilo está desarrollando desde el año 2010.

Imagen de satélite Las imágenes del satélite SPOT (*Système Pour L'Observation de la Terre*) son utilizadas en diversos campos de investigación, tales como la agricultura, cartografía marina costera, calidad de agua y otros ya que poseen una observación lateral y la alta resolución espacial y temporal (VOGELS *et al.*, 2019). Las Tablas 1 y 2 muestran las características orbitales y las propiedades espectrales del SPOT-6.

La imagen de satélite SPOT-6 fue adquirida por medio de la Agencia Espacial del Perú (CONIDA) mediante su aplicativo de la Oficina de Atención al Usuario (*Customer Office*, COF: DIM_SPOT6_PMS_201809281427160).

Likewise, we performed *in situ* observations using the guides for the collection and recognition of commercial brown algae in Peru (CARBAJAL & GAMARRA, 2018).

2. MATERIAL AND METHODS

The study area ranged from the port of Ilo (17°20'42,8"S) to Platanales (17°23'14,7"S) in the Moquegua Region (Fig. 1). We selected this area based on the evaluations that IMARPE-Ilo has been developing since 2010.

Satellite image. The images from the SPOT (*Système Pour L'Observation de la Terre*) satellite are used in various research fields, such as agriculture, coastal marine mapping, water quality, and others as they have a lateral observation and high spatial and temporal resolution (VOGELS *et al.*, 2019). Tables 1 and 2 show the orbital characteristics and spectral properties of SPOT-6.

The Peruvian Space Agency (CONIDA in Spanish) acquired the SPOT-6 satellite image through its User Assistance Office application (*Customer Office*, COF: DIM_SPOT6_PMS_201809281427160).

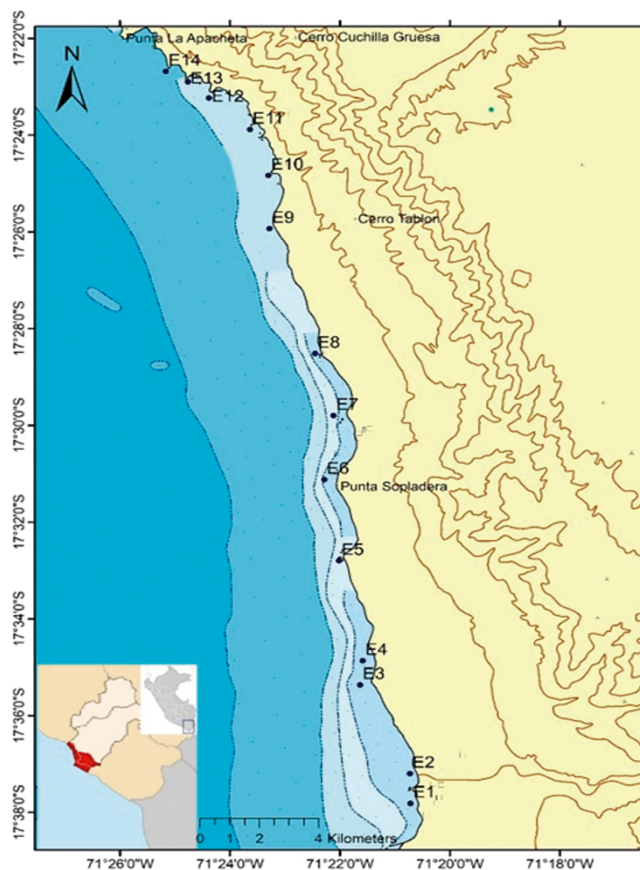


Figura 1.- Área de estudio: Ilo – Platanal (Región Moquegua)

Figure 1. Study area: Ilo – Platanal (Moquegua Region)

Tabla 1.- Característica del satélite SPOT-6
(Fuente: Astrium an Eads Company, 2013)

Table 1. Characteristics of the SPOT-6 satellite
(Source: Astrium an Eads Company, 2013)

Satélite / Satellite	SPOT-6
Fecha de Lanzamiento / Launch date	2012-09-09
Órbita / Orbit	Heliosincrónica casi polar
Altitud / Altitude	694 km
Nodo / Node	Descendente / Descending
Ángulo de inclinación de la órbita / Orbital inclination	98,2°
Periodo de la órbita / Orbit period	98,79 minutos / minutes
Nro. vueltas a la Tierra por día / # of turns to the Earth per day	14,6
Periodo de repetición / Repetition period	26 días / days
Revisita / Revisit	1~3 días (ángulo cenital de la visión > 45°) / (zenith angle > 45°)
Hora de Barrido / Sweeping time	10:00 a.m. (local)
Barrido en Nadir / Sweeping at Nadir	20 km x 20 km
Área por Gránulo / Area per granule	60 km x 60 km
Formatos / Formats	JP2, DIM, XML

Tabla 2.- Longitud de onda, resolución espacial y radiométrica de los canales SPOT-6

(Fuente: Astrium an Eads Company, 2013)

Table 2. Wavelength, spatial and radiometric resolution of SPOT-6 channels
(Source: Astrium an Eads Company, 2013)

Banda / Band	Rango de la Longitud de onda / Wavelength range (µm)	Resolución espacial / Spatial resolution (m)	Resolución radiométrica / Radiometric resolution
Azul / Blue	0,450 ~ 0,520	6,0	12 bits
Verde / Green	0,530 ~ 0,590		
Rojo / Red	0,625 ~ 0,695		
Pancromático / Panchromatic	0,450 ~ 0,745	1,5	

La fecha de la imagen corresponde al día 28 de setiembre del 2018 a las 14:27 horas (UTM), es una imagen multispectral que contiene los canales visibles (rojo, verde y azul) y está formada por doce gránulos de 20 km x 20 km, los datos productos han sido ortorectificados en la proyección geográfica y fusionada con el canal pancromático para obtener la resolución espacial de 1,5 m x 1,5 m.

Procesamiento de la imagen de satélite.- En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo del procesamiento digital de la imagen satelital, utilizando el programa ENVI 5.3 y el lenguaje de programación IDL 8.5.

Se realizaron los siguientes procedimientos:

Calibración radiométrica.- La calibración radiométrica es una conversión del Número Digital (ND) de los pixeles de la imagen a la radiancia espectral (L_λ) expresado por la ecuación (1):

The image is dated September 28, 2018, at 14:27 hours (UTM). It is a multispectral image that contains the visible channels (red, green, and blue) and is made up of twelve 20 km x 20 km granules. The product data has been orthorectified in the geographic projection and fused with the panchromatic channel to obtain a spatial resolution of 1.5 m x 1.5 m.

Satellite image processing.- Figure 2 shows the flowchart of digital processing of the satellite image, using the program ENVI 5.3 and the programming language IDL 8.5.

We conducted the following procedures:

Radiometric calibration.- Radiometric calibration is a conversion of the Digital Number (DN) of the pixels in the image to the spectral radiance (L_λ) expressed by the equation (1):

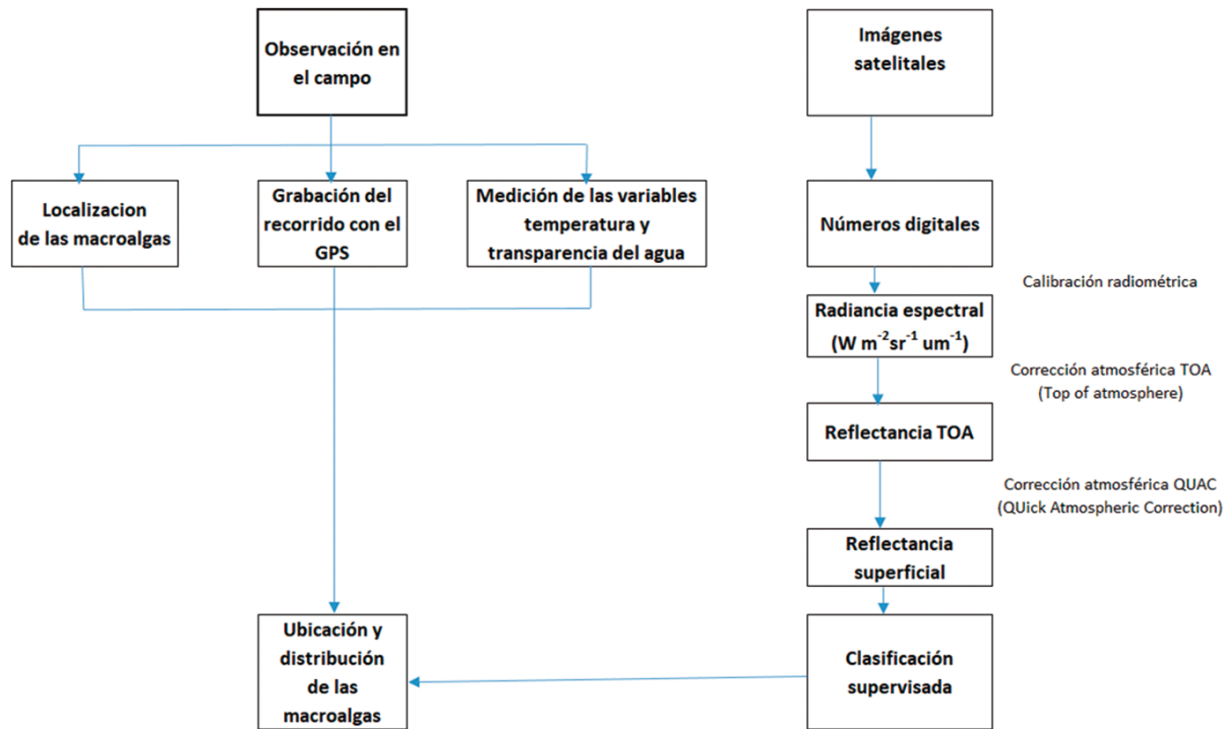


Figura 2.- Diagrama de flujo del procesamiento digital de la imagen SPOT-6 para la elaboración de mapas de distribución de macroalgas

Figure 2. Flowchart of SPOT-6 digital image processing for macroalgae distribution mapping

$$L_{\lambda} = \frac{ND}{a} + b \quad (ec.1)$$

Donde:

L_{λ} = radiancia espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr \cdot \mu m$)

a y b = coeficientes de calibración para cada canal visible almacenado en el archivo cabecero de los datos (Tabla 4).

Con el valor de la radiancia espectral (L_{λ}) se calcula la reflectancia TOA (*Top Of Atmosphere*, ρ_{TOA}), referido a la ecuación (2):

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{E_{Sol} \cos\theta_S} \quad (ec.2)$$

Donde:

d = es la razón de la distancia Sol – Tierra promedio a la distancia Sol – Tierra en el día del año, en unidades astronómicas AU. La distancia promedio entre el Sol – Tierra se define como una unidad astronómica (1 AU = 1,496 x 10⁸ km), la mínima y máxima distancias entre el Sol y la Tierra son 0,983 AU y 1,017 AU respectivamente (IQBAL, 1983).

E_{Sol} = es la irradiancia del Sol extraterrestre (Tabla 3) y

$$L_{\lambda} = \frac{ND}{a} + b \quad (eq.1)$$

Where:

L_{λ} = spectral radiance ($W \cdot m^{-2} \cdot sr \cdot \mu m$)

a and b = calibration coefficients for each visible channel stored in the data header file (Table 4).

With the value of the spectral radiance (L_{λ}), we calculate the TOA reflectance (Top Of Atmosphere, ρ_{TOA}), referred to the equation (2):

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{E_{Sol} \cos\theta_S} \quad (eq.2)$$

Where:

d = is the ratio of the mean Sun-Earth distance to the Sun-Earth distance on the day of the year, in astronomical units - AU. The mean Sun-Earth distance is defined as an astronomical unit (1 AU = 1.496 x 10⁸ km). The minimum and maximum Sun-Earth distances are 0.983 AU and 1.017 AU, respectively (IQBAL, 1983).

E_{Sol} = is the irradiancia of the extraterrestrial Sun (Table 3) and

Tabla 3.- Longitud de onda y los coeficientes de calibración de la imagen

Table 3. Wavelength and image calibration coefficients

Canal / Channel	Longitud de onda central / Central wavelength (nm)	a (Ganancia / Gains)	b (Offset)	Irradiancia del Sol extraterrestre / Irradiance from the extraterrestrial Sun (W·m ⁻² ·μm)
Azul / Blue	485	0,129032258065	0,0	1982,671954
Verde / Green	560	0,108108108108	0,0	1826,087443
Rojo / Red	660	0,096711798839	0,0	1540,494123

θ_s = el ángulo cenit del Sol que es un ángulo respecto a la normal del elemento de superficie y es el ángulo complementario del ángulo de elevación del Sol que tiene un valor de 54,22°.

θ_s = the zenith angle of the Sun which is an angle to the normal of the surface element and is the complementary angle to the elevation angle of the Sun which has a value of 54.22°.

Corrección atmosférica

La corrección atmosférica se realizó utilizando el módulo QUAC (*Quick Atmospheric Correction*) en el programa ENVI 5.3, que es un algoritmo semi empírico que se basa en la fórmula de transferencia radiativa expresada por la ecuación (3).

Atmospheric correction

We performed the atmospheric correction using the QUAC (*Quick Atmospheric Correction*) module in the ENVI 5.3 program, which is a semi-empirical algorithm based on the radiative transfer formula expressed by the equation (3).

$$\rho_{TOA}(\lambda) = A(\lambda) + \frac{B(\lambda)}{1 - S(\lambda) \cdot M\rho(\lambda)} \cdot \rho(\lambda) + \frac{C(\lambda)}{1 - S(\lambda) \cdot M\rho(\lambda)} \cdot M\rho(\lambda), \quad (ec.3)$$

$$\rho_{TOA}(\lambda) = A(\lambda) + \frac{B(\lambda)}{1 - S(\lambda) \cdot M\rho(\lambda)} \cdot \rho(\lambda) + \frac{C(\lambda)}{1 - S(\lambda) \cdot M\rho(\lambda)} \cdot M\rho(\lambda), \quad (eq.3)$$

Donde:

$\rho_{TOA}(\lambda)$ = es la reflectancia del camino,

$M\rho(\lambda)$ = es el promedio de la reflectancia de los objetos vecinos,

$\rho(\lambda)$ = es la reflectancia en el suelo,

$S(\lambda)$ = es el albedo planetario de la atmosfera de la Tierra,

$A(\lambda)$, $B(\lambda)$ y $C(\lambda)$ son los coeficientes relacionados con la transmitancia y *scattering* en este modelo.

Where:

$\rho_{TOA}(\lambda)$ = is the reflectance of the path,

$M\rho(\lambda)$ = is the average of the reflectance of the neighboring objects,

$\rho(\lambda)$ = is the reflectance on the ground,

$S(\lambda)$ = is the planetary albedo of the Earth's atmosphere,

$A(\lambda)$, $B(\lambda)$, and $C(\lambda)$ are the coefficients related to transmittance and scattering in this model.

Clasificación multiespectral de los datos

La clasificación multiespectral es un proceso automático mediante el cual se categorizan todos los pixeles de una imagen en clases o temas, el patrón espectral presente dentro de los datos de cada pixel se utiliza como la base numérica para la categorización. Este "patrón" se refiere a las mediciones de radiancia obtenidas de las diferentes bandas de longitud de onda para cada pixel (LILLESAND *et al.*, 2007), son tres las etapas (Fig. 3) que se realizan para efectuar una clasificación multiespectral, las cuales se desarrollan a continuación:

Multi-spectral classification of data

Multi-spectral classification is an automatic process whereby all pixels in an image are categorized into classes or themes. The spectral pattern present within each pixel's data is used as the numerical basis for the categorization. This "pattern" refers to the radiance measurements obtained from the different wavelength bands for each pixel (LILLESAND *et al.*, 2007). Three stages (Fig. 3) are performed to make a multi-spectral classification, which is developed below:



Figura 3.- Etapas de una clasificación multispectral de los datos del satélite

Figure 3. Stages of a multi-spectral classification of satellite data

Entrenamiento: el proceso de definición de la envolvente espectral de cada clase. Una clase de macroalgas puede definirse por algunas características tales como el rango de la reflectancia en diferentes longitudes de onda que denominamos firmas espectrales.

Evaluación de firmas: las firmas espectrales se verifican para determinar la representatividad de los hábitats que intentan describir y para asegurar un mínimo de superposición espectral entre firmas de diferentes hábitats. Las firmas pueden necesitar ser eliminadas, fusionadas o manipuladas.

Toma de decisiones: el proceso de ordenar todos los píxeles de la imagen en clases utilizando algoritmos matemáticos llamados “reglas de decisión”. Esta etapa a veces se denomina clasificación; sin embargo, en la práctica, la capacitación y la evaluación de firmas son partes integrales de todo el proceso (GREEN *et al.*, 2000).

Clasificación supervisada

En este trabajo utilizamos dos métodos de clasificación supervisada: *Support Vector Machine* (SVM) y la Máxima Verosimilitud, con el fin de comparar ambos métodos y obtener una mejor clasificación. El método SVM utiliza un criterio “geométrico” basado en el concepto de maximización de margen entre clases (MELGANI & BRUZZONE, 2004). En el caso de dos clases linealmente separables, las SVM identifican el hiperplano óptimo de separación con el fin de maximizar la distancia entre el hiperplano y los datos de entrenamiento más cercanos. Para las clases que no son linealmente separables, las SVM transforman los datos de entrenamiento a un espacio vectorial de mayores dimensiones a través de un Kernel, donde se puede establecer un hiperplano de separación lineal. (HSU *et al.*, 2016). Para la clasificación empleada en la imagen SPOT, se utilizó el núcleo predeterminado o *Radial Basis Functions* (RBF) (HARRIS GEOSPATIAL PRODUCTS DOCUMENTATION CENTER, 2009). Su representación matemática está en la ecuación 4.

$$k(x_i, x_j) = e^{-g\|x_i - x_j\|^2}, g > 0, \quad (\text{ec.4})$$

Training: the process of defining the spectral envelope of each class. We can define a class of macroalgae by some characteristics such as the range of reflectance at different wavelengths (spectral signatures).

Signature evaluation: we verify the spectral signatures to determine the representativeness of the habitats they are trying to describe and to ensure a minimum of spectral overlap between signatures from different habitats. Signatures may need to be removed, merged, or manipulated.

Decision-making: the process of arranging all pixels of the image into classes using mathematical algorithms called “decision rules”. This stage is sometimes called classification. However, the training and evaluation of signatures are an integral part of the whole process (GREEN *et al.*, 2000).

Supervised classification

In this work, we used two methods of supervised classification: *Support Vector Machine* (SVM) and *Maximum Likelihood* to compare both methods and obtain a better classification. The SVM method uses a “geometric” criterion based on the concept of margin maximization between classes (MELGANI & BRUZZONE, 2004). For two linearly separable classes, SVM identifies the optimal separation hyperplane to maximize the distance between the hyperplane and the closest training data. For classes that are not linearly separable, SVM transforms the training data into a larger vector space through a Kernel, where a linear separation hyperplane can be established (HSU *et al.*, 2016). For the classification used in the SPOT image, we used the default nucleus or *Radial Basis Functions* (RBF) (HARRIS GEOSPATIAL PRODUCTS DOCUMENTATION CENTER, 2009). Its mathematical representation is in equation 4.

$$k(x_i, x_j) = e^{-g\|x_i - x_j\|^2}, g > 0, \quad (\text{eq.4})$$

Donde:

$K(x_i, x_j)$ = es una función Kernel,

g = es el término gamma en la función del Kernel para todos los tipos de Kernel excepto lineal,

x_i y x_j = son datos de entrenamiento.

El método de la máxima verosimilitud trata de encontrar el valor de estimador de máxima verosímil (x_1, x_2, \dots, x_n) resolviendo la ecuación de verosimilitud (ec. 5):

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta_i} \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots m. \quad (\text{ec.5})$$

Donde $L(\theta)$ se define como la función de verosimilitud y está dado por el producto de las funciones de densidad $p(x_i; \theta)$ que indican la probabilidad de tomar los valores x_1, x_2, \dots, x_m cuando el parámetro es θ (ec. 6) (CHUVIECO, 1996; CANTY, 2014):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta), \quad i = 1, 2, \dots m. \quad (\text{ec.6})$$

Datos in situ

Las observaciones *in situ* se realizaron utilizando una embarcación artesanal, en 14 estaciones superficiales registrando: profundidad del lugar, temperatura superficial del mar (TSM) y transparencia del mar (Tabla 4).

Where:

$K(x_i, x_j)$ = is a Kernel function,

g = is the gamma term in the Kernel function for all types of Kernel except the linear one,

x_i and x_j = are training data.

The maximum likelihood method tries to find the maximum likelihood estimator value (x_1, x_2, \dots, x_n) by solving the likelihood equation (eq. 5):

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta_i} \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots m. \quad (\text{eq.5})$$

Where $L(\theta)$ is defined as the likelihood function and is given by the product of the density functions $p(x_i; \theta)$ which indicate the probability of taking the values x_1, x_2, \dots, x_m when the parameter is θ (ec. 6) (CHUVIECO, 1996; CANTY, 2014):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta), \quad i = 1, 2, \dots m. \quad (\text{eq.6})$$

In situ data

We performed the *in-situ* observations from a small-scale vessel, in 14 surface stations. We recorded: depth of the site, sea surface temperature (SST), and transparency of the sea (Table 4).

Tabla 4.- Estaciones de muestreo del 28 de diciembre 2018, zona puerto de Ilo a Platanal

Table 4. Sampling stations, Ilo to Platanal (December 28, 2018)

Estación / Station	Zona / Zone	Hora / Hour	Latitud S / Latitude S	Longitud W / Longitude W	Fondo / Bottom (m)	TSM / SST (°C)	Transparencia / Transparency (m)
1	Boca de Río	05:57	17°37'48"	71°20'42"	9,2	15,7	4,0
2	Boca de Río	06:11	17°37'29"	71°20'43"	3,5	16,0	3,0
3	EPS ILO	06:40	17°35'22"	71°21'37"	9,8	16,8	6,0
4	Fte. a Refinería	06:50	17°34'51"	71°21'35"	10,0	16,7	5,0
5	Planta GFK	07:14	17°32'48"	71°22'01"	12,0	16,7	5,0
6	Bahía Tablones	07:36	17°31'07"	71°22'17"	13,6	17,3	4,5
7	Fte. a Fundición	07:55	17°29'48"	71°22'07"	15,0	17,4	5,0
8	Escoria	08:13	17°28'30"	71°22'26"	14,2	18,3	5,5
9	Pocoma	08:53	17°25'56"	71°23'16"	7,2	19,4	4,0
10	Playa Gringos	09:10	17°24'50"	71°23'18"	13,5	18,3	4,0
11	Platanal norte	09:25	17°23'53"	71°23'37"	14,0	18,7	3,0
12	Platanal	09:41	17°23'14"	71°24'22"	24,0	18,7	4,0
13	Peñerío	09:50	17°22'53"	71°24'46"	24,0	18,7	4,0
14	Peñerío	10:00	17°22'41"	71°25'09"	24,0	18,7	4,0

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura Superficial del Mar (TSM)

La TSM en la zona de estudio varió entre 15,7 °C y 19,4 °C, el valor más bajo se registró frente a Boca del Rio y el mayor en Pocomá. Al comparar los valores registrados con la TSM promedio mensual de diciembre de la estación costera de IMARPE-Ilo (16,95 °C) encontramos que se registraron anomalías negativas (-1,25 a -0,25 °C) desde el Puerto de Ilo hasta frente a la Refinería y anomalías positivas (+0,35 a + 1,75 °C) cerca de Platanales.

Trasparencia (m)

La transparencia tuvo una variación entre 3 y 6 m de profundidad, la menor transparencia se registró frente a Boca del Rio y la mayor frente a Emisor de Ilo, el promedio de transparencia fue 4 m de profundidad. En general, estos bajos valores de transparencia registrados se encuentran asociados a la alta actividad planctónica y al aporte de sólidos en suspensión de origen natural y antrópico.

Firma espectral

Se compararon las firmas espectrales de reflectancia TOA (Fig. 4a) y la reflectancia superficial (Fig. 4b) de la macroalga *L. nigrescens*, agua y otros objetos; no se elaboró la firma de *L. trabeculata* ya que se distribuyen en ambientes submareales de 4 a 25 metros de profundidad con longitud de 2 metros (CARBAJAL y GAMARRA, 2018) lo cual es difícil de ser detectado por los sensores ópticos.

Las firmas de reflectancia TOA muestran que no existe mayor diferencia de valores entre macroalgas, rocas, sombras y cuerpos de agua (Fig. 4a). Luego de efectuar la corrección atmosférica (QUAC) se observó que las macroalgas tienen un valor mínimo y máximo en el canal azul ($\lambda = 485$ nm) y rojo ($\lambda = 660$ nm) respectivamente, mientras que, para los demás objetos, la reflectancia es menor en el canal rojo, este comportamiento ayudó a distinguir las macroalgas de los demás objetos vecinos (Fig. 4b).

Clasificación de macroalgas

Se utilizaron dos métodos de la clasificación supervisada: *Support Vector Machine* (SVM) y la Máxima Verosimilitud, con el fin de optimizar la identificación de las macroalgas, donde los datos de entrenamiento están separados por quince clases que representan distintos objetos en la Tierra. La figura 5 muestra la comparación de área estimada de las macroalgas a través de ambos métodos para la zona norte de Platanales. Se puede observar que, a través del método

3. RESULTS AND DISCUSSION

Sea Surface Temperature (SST)

In the study area, the SST ranged from 15.7°C to 19.4°C, with the lowest value recorded in Boca del Rio and the highest one in Pocomá. When comparing the recorded values with the mean monthly SST for December at the IMARPE-Ilo coastal station (16.95°C), we found that negative anomalies (-1.25 to -0.25°C) were recorded from the Port of Ilo until off the Refinery and positive anomalies (+0.35 to + 1.75°C) were located near Platanales.

Transparency (m)

The transparency varied between 3 and 6 m deep. The lowest transparency was recorded off Boca del Rio and the highest off Ilo's emitter, the mean transparency was 4 m deep. Overall, these low transparency values are associated with high planktonic activity and the contribution of natural and anthropogenic suspended solids.

Spectral signatures

We compared the spectral signatures of TOA reflectance (Fig. 4a) and the surface reflectance (Fig. 4b) of the macroalgae *L. nigrescens*, water, and other objects. We did not elaborate the signature of *L. trabeculata* since they are distributed in subtidal environments from 4 to 25 meters deep with a length of 2 meters (CARBAJAL & GAMARRA, 2018) so they are difficult to be detected by optical sensors.

The TOA reflectance signatures show that there is no major difference in values between macroalgae, rocks, shadows, and water masses (Fig. 4a). After performing the atmospheric correction (QUAC), we observed that the macroalgae have a minimum and maximum value in the blue channel ($\lambda = 485$ nm) and red channel ($\lambda = 660$ nm), respectively, while for the other objects, the reflectance is lower in the red channel. This behavior helped to distinguish macroalgae from the other neighboring objects (Fig. 4b).

Classification of macroalgae

We applied two methods of supervised classification: Support Vector Machine (SVM) and Maximum Likelihood to optimize the identification of macroalgae, where the training data is separated by fifteen classes representing different objects on Earth. Figure 5 shows the comparison of the estimated area of macroalgae through both methods for northern Platanales. We can notice

de SVM se presenta mejor el mapa de distribución de macroalgas, las cuales se ubican normalmente en los bordes de las rocas costeras (Fig. 5a), en cambio, con el método de máxima verosimilitud presenta ciertas dificultades para distinguir las macroalgas con las olas (círculos rojos en la Fig. 5b).

Mapas de distribución de macroalgas

El mapa de distribución de macroalgas elaborado usando el método SVM (Fig. 6), nos indica que las líneas verdes corresponden a la presencia de este recurso, presentando distribución discontinua y se focaliza principalmente en el intermareal rocoso, las mayores concentraciones se ubicaron desde Jaboncillo hasta el norte de Platanales, entre las estaciones 10 y 12 de las playas de Wawakiki y Platanales. Estos resultados fueron corroborados con las observaciones *in situ* donde se obtuvo un registro fotográfico, lo que permitió convalidar el método.

Se calculó un total de $1,679 \times 10^4$ pixeles con presencia de macroalgas, lo que equivale a un área de $3,777 \times 10^4 \text{ m}^2$ ($37,770 \text{ m}^2$) en la zona costera entre el puerto de Ilo y Platanales (debido a que cada pixel tiene un área de $2,25 \text{ m}^2$ por la resolución espacial de las imágenes SPOT-6 de 1,5 m), se detectó un cinturón de 35 km de largo aproximadamente.

that the SVM method presents a better map of the macroalgae distribution, which are normally located on the edges of coastal rocks (Fig. 5a), but with the maximum likelihood method, it presents some difficulties to distinguish macroalgae from waves (red circles in Fig. 5b).

Macroalgae distribution maps

According to the map of macroalgae distribution elaborated using the SVM method (Fig. 6), the green lines correspond to the presence of this resource, presenting discontinuous distribution and focusing mainly on rocky intertidal zones, the highest concentrations were located from Jaboncillo to northern Platanales, between stations 10 and 12 at Wawakiki and Platanales beaches. These results were corroborated with the *in-situ* observations where we obtained a photographic record, which allowed us to validate the method.

We estimated a total of 1.679×10^4 pixels with the presence of macroalgae, which is equivalent to an area of $3.777 \times 10^4 \text{ m}^2$ ($37,770 \text{ m}^2$) in the coastal area between Ilo and Platanales (since each pixel has an area of 2.25 m^2 due to the spatial resolution of SPOT-6 images of 1.5 m). Also, we detected a belt of approximately 35 km long.

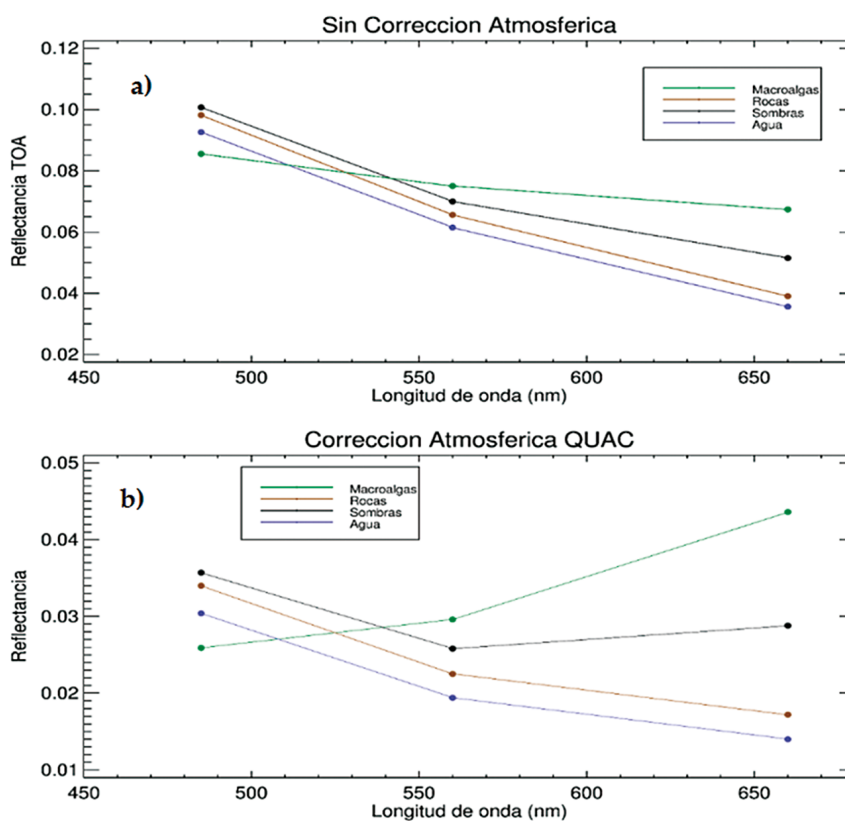


Figura 4.- Firmas espectrales de los objetos (a) antes y (b) después de la corrección atmosférica QUAC

Figure 4. Spectral signatures of objects (a) before and (b) after QUAC atmospheric correction

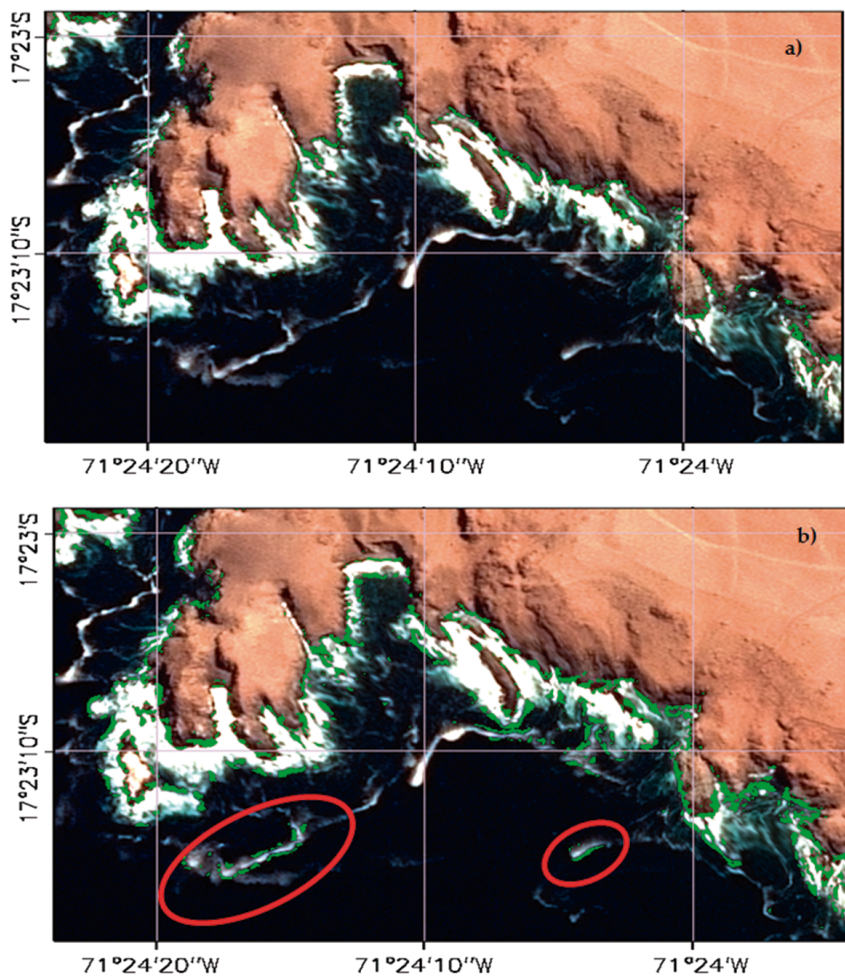


Figura 5.- Comparación de clasificación por el método (a) SVM y (b) Máxima verosimilitud
 Figure 5. Classification comparison by (a) SVM method and (b) Maximum likelihood

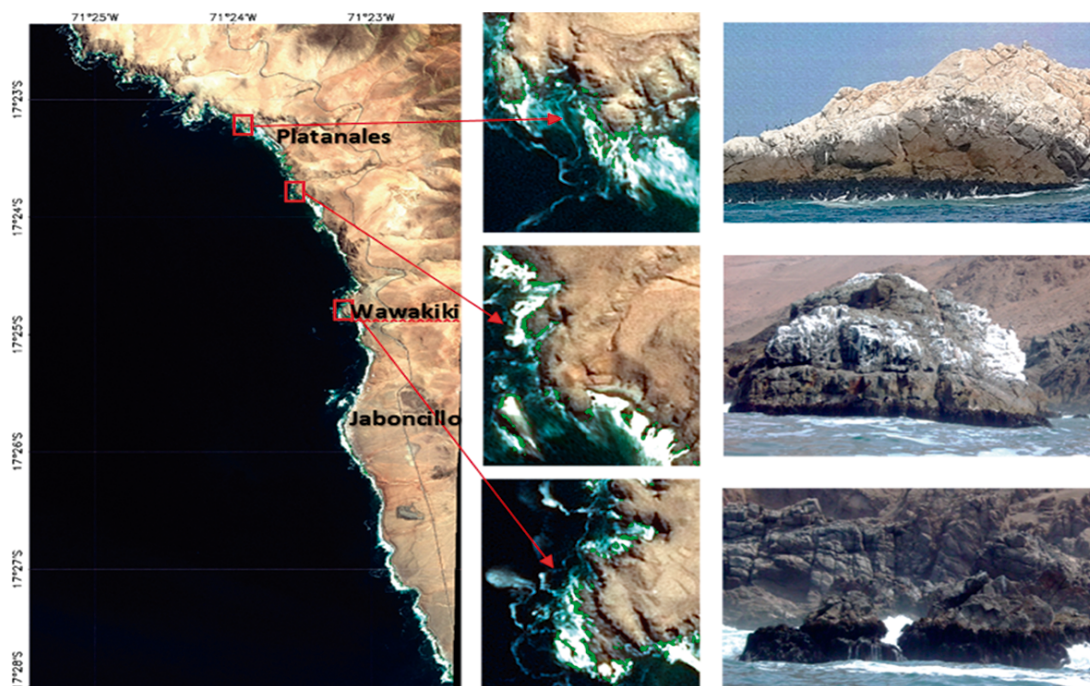


Figura 6.- Distribución de macroalgas a lo largo de la costa de Moquegua
 Figure 6. Distribution of macroalgae along the Moqueguan coast

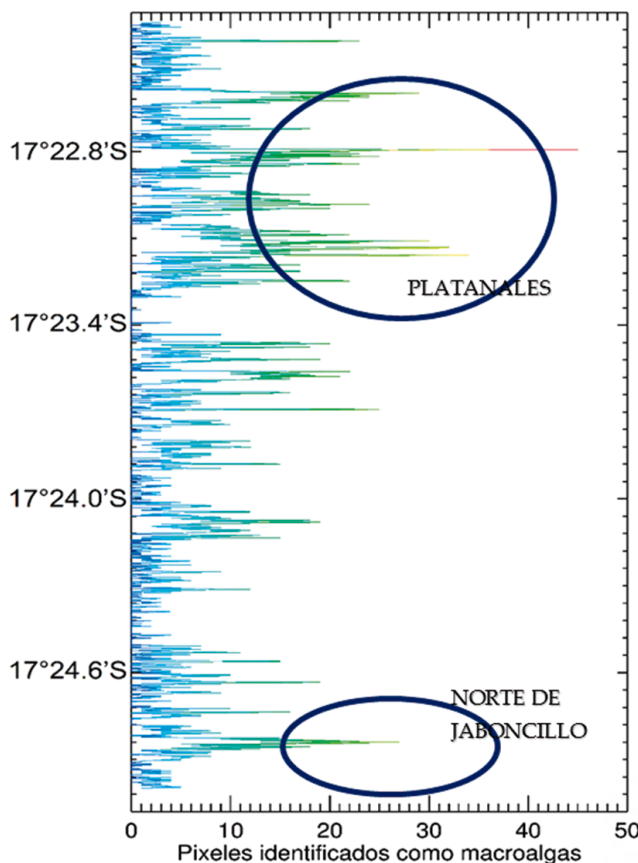


Figura 7.- Distribución latitudinal de macroalgas

Figure 7. Latitudinal distribution of macroalgae

Distribución latitudinal de macroalgas

En la zona de los Platanales (17°23,2'S - 17°22,5'S) se ubica la mayor concentración de macroalgas y se puede observar también menor densidad a lo largo de la costa entre el norte de Jaboncillo y los Platanales (17°25,0'S a 17°23,4'S) (Fig. 7).

Latitudinal distribution of macroalgae

In Platanales (17°23.2'S - 17°22.5'S) we found the highest concentration of macroalgae and we can also observe a lower density along the coast between the north of Jaboncillo and Platanales (17°25.0'S to 17°23.4'S) (Fig. 7).

4. CONCLUSIONES

Las imágenes de satélite de alta resolución espacial como el SPOT-6 permitieron detectar las praderas de macroalgas pardas, que crecen en el intermareal rocoso en forma de franjas.

4. CONCLUSIONS

High-resolution spatial satellite images such as SPOT-6 made it possible to detect the meadows of brown macroalgae, which grow in the rocky intertidal area forming stripes.

Los valores bajos de transparencia del agua se asocian a la alta actividad planctónica y al aporte de sólidos en suspensión de origen natural y antrópico.

The low values of water transparency are associated with the high planktonic activity and the contribution of suspended solids of natural and anthropogenic origin.

Las macroalgas, las rocas, la sombra y el agua pueden diferenciarse a nivel de reflectancia de los canales visibles a través de la corrección atmosférica QUAC.

We can differentiate macroalgae, rocks, shade, and water at the level of reflectance from the visible channels through the QUAC atmospheric correction.

Al comparar los métodos de clasificación supervisada, el SVM distingue mejor la distribución de macroalgas que la de máxima verosimilitud que presenta dificultad para distinguir entre las macroalgas y las olas.

Se observó que la macroalga *Lessonia nigrescens* se ubica en ambientes del intermareal rocoso a lo largo de la costa de Moquegua, donde la zona de mayor concentración fue desde Jaboncillo a Platanales y la situada entre el puerto de Ilo a Jaboncillo presenta distribución más dispersa.

Se estimó un área total de $3,777 \times 10^4$ m² de praderas de macroalgas para la zona de estudio, donde 80% de la distribución se encuentra a partir del Jaboncillo hacia el norte.

El perfil latitudinal muestra que la mayor concentración de macroalgas fue en la zona de los Platanales en setiembre que coincidió con observación del campo en diciembre, este resultado indicaría la poca variabilidad de la distribución en la zona de estudio en ese periodo.

La elaboración de mapas de distribución de macroalgas usando imágenes de satélite de alta resolución espacial con observaciones "in situ", demuestran que es una aplicación satisfactoria y se deben incluir en las evaluaciones directas que se realizan a estos recursos.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Agencia Espacial del Perú (CONIDA) por proporcionarnos la imagen de satélite SPOT-6 y a los biólogos Alex Tejada y Danny Baldarrago profesionales del Laboratorio Costero de Ilo, por su apoyo brindado en los trabajos de campo y referencias bibliográficas sobre este recurso.

When comparing supervised classification methods, the SVM is better at distinguishing the distribution of macroalgae than the maximum likelihood distribution which presents difficulty in distinguishing between macroalgae and waves.

We observed that *Lessonia nigrescens* is located in rocky intertidal environments along the Moqueguan coast, where the area of greatest concentration was from Jaboncillo to Platanales and the more scattered distribution was between Ilo and Jaboncillo.

We estimated a total area of 3.777×10^4 m² of macroalgae meadows for the study area, where 80% of the distribution is located from the Jaboncillo to the north.

The latitudinal profile shows that the highest concentration of macroalgae was in Platanales (September) which coincided with field observation in December. This result would indicate the low variability of the distribution in the study area in that period.

The mapping of macroalgae distribution using high spatial resolution satellite images with *in situ* observations shows that it is a satisfactory application and should be included in the direct evaluations made to these resources.

Acknowledgments

We would like to thank the Peruvian Space Agency (CONIDA) for providing us with the SPOT-6 satellite image and to the biologists Alex Tejada and Danny Baldarrago, who work in the Coastal Laboratory of Ilo, for their support in the fieldwork and bibliographic references on this resource.

REFERENCIAS / REFERENCES

- ASTRIUM AN EADS COMPANY. 2013. SPOT-6 & SPOT-7 Imagery User Guide. SI/DC/13034-v1.0. http://www.guyane-sig.fr/data/services_web/seas/specs/spot-6-7_fiche-technique-detaillee.pdf
- CANTY M J. 2014. Image analysis, classification and change detection in remote sensing with algorithms for ENVI/IDL and Python. CRC Press Taylor & Francis Group. 494 pp.
- CARBAJAL P, GAMARRA A. 2018. Guía para recolección y reconocimiento de macroalgas pardas comerciales del Perú. Inf Inst Mar Perú. 45(2). 169-181.
- CHUVIECO E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones RIALP, S.A. 3.
- GREEN E P, MUMBY P J, EDWARDS A J, CLARK C D. 2000. Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management. Coastal Management Sourcebooks 3. UNESCO Publishing. 316.
- GOWER J, HU C M, BORSTAD G, KING S. 2006. Ocean color satellites show extensive lines of floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 44(12): 3619-3625. 568.
- HARRIS GEOSPATIAL PRODUCTS DOCUMENTATION CENTER. 2009. Support Vector Machine. <https://www.harrisgeospatial.com/docs/SupportVectorMachine.html>

- HOSSAIN M S, BUJANG J S, ZAKARIA M H, HASHIM M. 2014. The application of remote sensing to seagrass ecosystems: an overview and future research prospects. *International Journal of Remote Sensing*. 36(1): 61-113.
- HSU C W, CHANG C C, LIN, C J. 2016. A practical guide to support vector classification. National Taiwan University: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin>. 16 pp.
- HU C M. 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*. 113: 2118-2129.
- HU C, FENG L, HARDY R F, HOCHBERG E J. 2015. Spectral and spatial requirements of remote measurements of pelagic sargassum macroalgae. *Remote Sensing of Environment*. 167: 229-246.
- IMARPE. Informe Final. Proyecto UE – Perú/PENX ALA/2004/016-913. Código Ref. Mincetur POG 3.3.2.1. Sector Pesca y Acuicultura. Lima. 90 pp.
- IMARPE- ILO. 2010. Evaluación poblacional de las praderas de macroalgas y su fauna asociada en el litoral marino de la región de Moquegua. Gobierno Regional de Moquegua, Dirección Regional de la Producción. Informe Final-IMARPE. 64.
- IMARPE- ILO. 2014. Evaluación del recurso macroalgas *Lessonia nigrescens* y *Lessonia trabeculata* en el litoral de la Provincia de Ilo, Región Moquegua". Inf Interno Inst Mar Perú. 30 pp.
- IQBAL M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press. 390 pp.
- KUTSER T, VAHTMÄE E, ROHTLA L M. 2006. Spectral library of macroalgae and benthic substrates in Estonian coastal waters. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.* 55 (4): 329-340.
- LILLESAND T, KIEFER R, CHIPMAN J. 2007. Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley India 6th Edition. New Delhi-India. 763 pp.
- MELGANI F, BRUZZONE L. 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 42(8): 1778-1790.
- TEJADA A, BALDARRAGO D, VILLANUEVA J, GAMARRA A. 2019. Evaluación del recurso *Lessonia trabeculata* Villouta y Santelices, 1986 en la provincia de Ilo, Región Moquegua. Octubre 2015. Inf Inst Mar Perú. 46 (1): 52-59.
- VÁSQUEZ J A. 2009. Estudio de investigación de poblaciones y de las condiciones de viabilidad ecológica de las actividades extractivas de algas pardas e invertebrados en la zona costera sur, en apoyo de la investigación y desarrollo del Instituto del Mar del Perú.
- VOGELS M F A, DE JONG S M, STERK G, ADDINK E A. 2019. Mapping irrigated agriculture in complex landscapes using SPOT 6 imagery and object based image analysis – A case study in the Central Rift Valley, Ethiopia. *ELSEVIER. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 75: 118-129.