

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE MATEMÁTICA, ASTRONOMÍA, FÍSICA Y  
COMPUTACIÓN

Trabajo Especial de Licenciatura en Física:  
**Estudio de la influencia de la geometría de observación  
en las correcciones atmosféricas de un sensor  
del color del mar**

**Alumno:** Augusto Romero Carena

**Directora:** Dra. Carolina Tauro

**Profesor representante:** Dr. Francisco Tamarit

Diciembre 2023

Estudio de la influencia de la geometría de observación en las correcciones atmosféricas de un sensor del color del mar © 2024 by Augusto Romero Carena is licensed under Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International .



### Resumen:

Las técnicas de teleobservación satelital se han convertido en una herramienta fundamental para el monitoreo de nuestro planeta. Dentro de ellas se destaca la *teleobservación del Color del Mar*, que se basa en el estudio de las variaciones espectrales de la radiancia que emerge de la superficie del mar en el rango del visible. Los datos de *color del mar* permiten monitorear la productividad primaria de los mares mediante la estimación de la cantidad de fitoplancton presente en ellos, el monitoreo de sedimentos costeros y cambios en la calidad del agua costera debidos a fenómenos como las floraciones algales.

Un proceso clave para llegar a estas variables consiste en obtener la radiancia que emerge desde la superficie del mar a partir de la radiancia que llega al sensor satelital en el tope de la atmósfera. Este proceso se conoce como *correcciones atmosféricas*, ya que la mayor contribución que se requiere *limpiar* de la señal es debida a la interacción de la radiación con los componentes de la atmósfera. Los modelos de correcciones atmosféricas actualmente operativos dependen fuertemente de las características espectrales y la geometría de adquisición de cada sensor en particular.

Este plan de trabajo se plantea en el marco de la misión SABIA-Mar que está siendo desarrollada actualmente por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) dentro del marco del Plan Espacial Nacional, con lanzamiento estimado para el año 2025. Los sensores para la teledetección del *color del mar* a bordo de SABIA-Mar tienen una geometría de observación multiangular, en contraposición a la geometría usual con un único ángulo de visión.

En este trabajo se analizó el desempeño del algoritmo de correcciones atmosféricas estándar para una geometría de adquisición donde el ángulo de observación depende de la longitud de onda. Se compararon los errores cometidos respecto al caso de una geometría con un único ángulo de observación. Si bien se observa una leve pérdida de la precisión en la región de los 412nm, los resultados obtenidos son prometedores y sugieren que es factible obtener valores de reflectancia saliente del agua con errores comparables al caso estándar.

### Abstract:

Satellite remote sensing techniques have become a fundamental tool for monitoring our planet. Among them, *Sea Color Remote Sensing* stands out, which is based on studying the spectral variations of radiance emerging from the sea surface in the visible range. Sea color data allows monitoring the primary productivity of the oceans by estimating the amount of phytoplankton present in them, monitoring coastal sediments, and changes in coastal water quality due to phenomena such as algal blooms.

A key process to obtain these variables involves obtaining the radiance emerging from the sea surface from the radiance reaching the satellite sensor at the top of the atmosphere. This process is known as *atmospheric corrections*, as the main contribution that needs to be *cleaned* from the signal is due to the interaction of radiation with atmospheric components. Currently operational atmospheric correction models heavily depend on the spectral characteristics and acquisition geometry of each particular sensor.

This work is proposed within the framework of the SABIA-Mar mission, which is currently being developed by the Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) within the framework of the National Space Plan, with an estimated launch in 2025. The sensors for sea color remote sensing aboard SABIA-Mar have a multi-angular observation geometry, in contrast to the usual geometry with a single viewing angle.

In this study, the performance of the standard atmospheric correction algorithm was analyzed for an acquisition geometry where the observation angle depends on the wavelength. Errors were compared to the case of a geometry with a single viewing angle. Although a slight loss of accuracy is observed in the 412nm region, the results obtained are promising and suggest that obtaining outgoing water reflectance values with errors comparable to the standard case is feasible.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Motivaciones y objetivos . . . . .	5
1.2. Organización del trabajo . . . . .	6
<b>2. Teledetección satelital del Color del Mar</b>	<b>7</b>
2.1. Sistemas de teledetección espacial . . . . .	7
2.2. Teledetección del Color del Mar . . . . .	8
2.2.1. Principios físicos y definiciones . . . . .	9
2.2.2. Interacción de la radiación con la atmósfera . . . . .	12
2.3. Características de la Misión SABIA-Mar . . . . .	13
<b>3. Algoritmo de correcciones atmosféricas</b>	<b>17</b>
3.1. Ecuación de transferencia radiativa . . . . .	17
3.2. Correcciones atmosféricas en la región del visible . . . . .	18
3.3. Efecto de la geometría de observación . . . . .	22
3.4. Algoritmo SMAC . . . . .	24
<b>4. Metodología de trabajo</b>	<b>27</b>
4.1. Esquema de trabajo . . . . .	27
4.2. Simulación de la verdad de campo . . . . .	28
4.3. Escenario de observación de SABIA-Mar . . . . .	29
4.3.1. Geometría de observación con ángulo único (SA) . . . . .	29
4.3.2. Geometría de observación con ángulo variable (MA) . . . . .	29
4.4. Condiciones atmosféricas y superficiales . . . . .	30
4.4.1. Modelos de aerosoles . . . . .	30
4.5. Métricas y estrategia de evaluación . . . . .	32
<b>5. Resultados</b>	<b>35</b>
5.1. Condiciones de simulación . . . . .	35
5.2. Resultados para el Modelo Marítimo . . . . .	36
5.2.1. Caso de ángulo único (SA) . . . . .	36
5.2.2. Caso de ángulo variable (MA) . . . . .	41
5.3. Análisis de los resultados obtenidos para cada modelo . . . . .	47
5.3.1. Comparaciones entre modelos . . . . .	53
<b>6. Discusiones y trabajos futuros</b>	<b>55</b>



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivaciones y objetivos

La observación sistemática de la Tierra es la clave para pronosticar la evolución de los sistemas dinámicos terrestres. La superficie de nuestro planeta sufre constantes modificaciones debidas a la evolución de la naturaleza, a la mano del hombre, y la interacción entre ambos. Tanto los sistemas naturales hidrológicos, tectónicos, fluviales, eólicos, etc, como la urbanización e industrialización, son ejemplos de causas fundamentales del dinamismo de la Tierra. Conocer en detalle el comportamiento de estos sistemas tiene gran importancia en la predicción de escenarios futuros y es entonces, donde la teledetección se convierte en una herramienta fundamental.

La *teledetección, teleobservación o sensado remoto* es una técnica que nace de la necesidad de estudiar el cambio y evolución de objetos de escalas extensas como lo son los sistemas dinámicos terrestres. Consiste en la recopilación de datos e información del objeto estudiado sin la necesidad de que el instrumento de medición este en contacto directo con el mismo. Este enfoque implica la adquisición de datos a distancia utilizando sensores que se montan en satélites, aviones, drones u otras plataformas aéreas. Es una ciencia aplicada, y como tal, muy dependiente del estado del desarrollo tecnológico existente en cada momento [1].

La teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental en el estudio del medio ambiente, la tierra, los océanos y la atmósfera, dada la capacidad de visión panorámica y estudio del sistema de manera integral, imposible de equiparar con mediciones de campo. Permite obtener información detallada y actualizada sobre extensas áreas terrestres de manera rápida y eficiente dada la cobertura global, exhaustiva, panorámica y repetitiva que ofrece, lo que la convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones en diversos campos, así como para comprender mejor los cambios y procesos en la superficie terrestre a lo largo del tiempo.

Dentro de las técnicas de teledetección se destaca la *teleobservación del Color del Mar*, que se basa en el estudio de las variaciones espectrales de la radiancia que emerge de la superficie del mar en el rango del visible, es decir la variación de la magnitud de la radiancia para distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Esta técnica ha demostrado ser de gran utilidad para detectar y cuantificar tendencias de ciertas propiedades bio-geo-físicas a distintas escalas temporales. En el caso de los mares y océanos, el uso de las herramientas satelitales y geoespaciales aporta una visión sinóptica única, imposible de equiparar con métodos de medición de campo debido a la inaccesibilidad y al elevado costo de los monitoreos *in situ* particularmente escasos en el Atlántico Sudoccidental [2].

Los datos de *color del mar* nos permiten monitorear la productividad primaria de los mares mediante la estimación de la cantidad de organismos microscópicos autótrofos (fitoplancton) presente en ellos, el monitoreo de sedimentos costeros y cambios en la calidad del agua costera debidos a fenómenos como las floraciones algales y otros eventos de emergencias. En términos económicos, el fitoplancton es considerado la base de toda la producción animal en el mar abierto, el sostén principal de las redes alimenticias sobre la cual las pesquerías mundiales se sustentan. Resulta importante, entonces, poder monitorear las poblaciones fitoplanctónicas ya que modificaciones en su abundancia y del momento de su floración pueden afectar la distribución y abundancia de las poblaciones de peces y en consecuencia a las pesquerías.

Este trabajo se plantea en el marco de la misión SABIA-Mar (Satélite de Aplicaciones Basadas en

la Información Ambiental del Mar) que está siendo desarrollada actualmente por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) dentro del marco del Plan Espacial Nacional con lanzamiento estimado para el año 2025. SABIA-Mar fue gestada como una gran contribución para los estudios costeros regionales de Latinoamérica, cuyo objetivo principal es proveer información y productos para el estudio de los ecosistemas marinos, el ciclo del carbono, la dinámica costera y los hábitats marinos. Esta misión contribuye directamente a los objetivos de la iniciativa nacional Pampa Azul, y a varios de los indicadores de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) de la ONU, como así también a la Década de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible proclamada por la ONU para el periodo 2021-2030. Específicamente esta misión brindará información del *Color del Mar* a escala global con resolución espacial de 800m e información de las costas de Sudamérica a resolución media (200m) [3].

SABIA-Mar generará una serie de productos de interés no sólo para la comunidad científica sino también como aporte al sector productivo: la radiancia que emerge de la superficie del mar en rango óptico, la concentración de Clorofila-a, el coeficiente de atenuación difusa, la turbidez y la radiación disponible para fotosíntesis. Un proceso clave para llegar a estas variables consiste en obtener la radiancia que emerge a nivel del mar a partir de la radiancia que llega al sensor satelital en el tope de la atmósfera (TOA: top of atmosphere). Este proceso se conoce como *correcciones atmosféricas*, ya que la mayor contribución que se requiere *limpiar* de la señal es debida a la interacción de la radiación con los componentes de la atmósfera.

Los modelos de correcciones atmosféricas han sido estudiados e implementados en numerosas misiones satelitales [4, 5] y dependen fuertemente de las características espectrales y la geometría de adquisición de cada sensor en particular. En este sentido, los sensores para la teledetección del *color del mar* a bordo de SABIA-Mar [6, 7] tienen una geometría de observación particular que la hace única. Por este motivo, el Equipo de Ciencia de la Misión SABIA-Mar viene desarrollando los algoritmos de correcciones atmosféricas apropiados para SABIA-Mar, los cuales incorporan la dependencia angular a los algoritmos ya existentes [7].

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar las diferencias que existen en la obtención de la radiancia emergente del agua al aplicar los algoritmos estándares de correcciones atmosféricas al caso en que las bandas espectrales tienen diferentes ángulos de observación respecto al caso típico en el cual todas las bandas tienen el mismo ángulo de observación.

Para llegar al objetivo planteado, se abordarán las siguientes tareas:

- Establecer parámetros de error para caracterizar el valor de error en la determinación de la radiancia emergente de la superficie del mar a partir de las simulaciones.
- Calcular tales errores en el caso de un ángulo de observación.
- Repetir para el caso de diferentes ángulos de observación.
- Comparar ambos casos y establecer cuánto cambia el desempeño del algoritmo.
- Analizar el error proveniente del modelo en el caso de SABIA-Mar.

## 1.2. Organización del trabajo

En el capítulo 2 se introducen los conceptos teóricos relacionados a la teledetección en general con especial foco en la teledetección del *color del mar*. En el capítulo 3 se explica de que manera será adaptado el algoritmo estándar de correcciones atmosféricas al caso del satélite de SABIA-Mar con variación en los ángulos de observación de cada banda espectral. En el capítulo 4 se explica la metodología a seguir y el conjunto de estimadores y métricas a utilizar. En el capítulo 5 se evalúan y analizan los resultados obtenidos para las distintas simulaciones estudiadas con varias combinaciones de condiciones del entorno. Por último, en el capítulo 6 se plantean las conclusiones sobre el rendimiento del algoritmo modificado y evalúa su posible utilidad según distintos parámetros ambientales. También se proponen trabajos a realizar para continuar con el proyecto.

## Capítulo 2

# Teledetección satelital del Color del Mar

En este capítulo introduciremos todos los conceptos teóricos que usaremos a lo largo de todo el trabajo. Comenzaremos dando una explicación cualitativa de qué es el proceso de teledetección satelital en general y la teleobservación del *color del mar* en particular, ya que es la que nos interesa en este trabajo. Luego, explicaremos los principios físicos que sustenta la teledetección, y en detalle, los problemas que conlleva y cómo pueden abordarse. Finalmente, mostraremos las características de la Misión SABIA-Mar que motivan este trabajo.

### 2.1. Sistemas de teledetección espacial

Un sistema de teledetección espacial está compuesto por los elementos que se esquematizan en la figura 2.1 y se describen a continuación:

1. Fuente de energía que es el origen de la radiación que detecta el sensor.
2. Medio de propagación a través del cuál viaja la energía y la información.
3. Cubierta terrestre que recibe la energía proveniente de la fuente y la refleja, aunque también puede emitir su propia energía.
4. Sistema sensor, compuesto por el sensor y la plataforma satelital que lo sostiene.
5. Sistema de recepción donde se recibe la información transmitida por la plataforma.
6. Intérprete que convierte esos datos recibidos en información temática de interés.
7. Usuario final que analiza el producto fruto de la interpretación.

La información se obtiene a partir de la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre. Los sensores remotos pueden detectar diferentes longitudes de onda de la radiación, incluyendo luz visible, infrarroja, térmica, radar y otras bandas del espectro electromagnético. A grandes rasgos, el funcionamiento de un satélite de observación de la Tierra se podría resumir brevemente de la siguiente manera. La superficie terrestre refleja (o en algunos casos emite, por ejemplo energía térmica) la energía que le llega, en la mayoría de los casos proveniente del sol o emitido por el mismo sensor, luego de interactuar con el tipo de cubierta o superficie en cuestión. Este flujo reflejado es el que capta el sensor a bordo del satélite, que luego lo transmite a las estaciones receptoras. El principal problema que encontraremos con la teledetección es que entre la superficie y el sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. Por lo tanto, dependiendo en qué rango del espectro electromagnético se trabaje, hay que emplear distintos métodos y técnicas para limpiar y corregir la señal.

Según la fuente de energía que utilizan, existen dos clases principales de sensores remotos:

- Sensores pasivos: se limitan a recibir la energía emitida o reflejada por un foco natural exterior a ellos. Por ejemplo los sensores ópticos, cuya fuente de iluminación es el sol.
- Sensores activos: son capaces de emitir su propio haz de energía mediante fuentes internas. Un ejemplo lo constituye el RADAR (Radio Detection and Ranging) que opera en la región del microondas del espectro electromagnético.

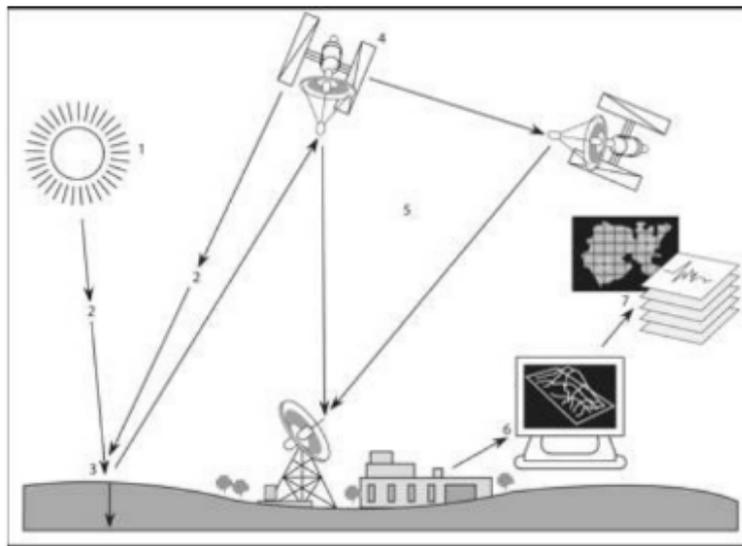


Figura 2.1: Esquema de los componentes de un sistema de teledetección. Extraída de [1]

Otras características que definen a los sensores son su resolución espacial y espectral. La primera se refiere a la distancia en el terreno que corresponde a la mínima unidad de información de la imagen o píxel. La resolución espectral está definida por el espesor de la banda electromagnética que es capaz de discernir el sensor.

Finalmente, los satélites de observación de la Tierra operan principalmente en dos tipos de órbitas:

- **Órbita Polar Heliosincrónica:** con este tipo de orbita se aprovecha el movimiento de la Tierra para observar el mismo punto cada cierto tiempo y cubrir la mayor superficie. Durante el vuelo de polo a polo, la Tierra gira debajo del satélite y este cubre franjas, que luego se juntan para formar la imagen global. Generalmente la altura y la velocidad de la plataforma se calculan para que esta observe cada porción de la tierra a una hora fija. Estos satélites tienen una altura orbital de entre 600 y 850 km.
- **Órbita Geo-estacionaria:** orbitan a una altura de aproximadamente 36000 km lo que les permite sincronizarse al movimiento de rotación de la Tierra y observar siempre la misma zona. Además al estar en órbitas muy alejadas pueden observar una gran porción de la Tierra, que los hace aptos para determinaciones meteorológicas.

## 2.2. Teledetección del Color del Mar

Una de las principales aplicaciones de la teleobservación está dirigida al estudio de mares, océanos y cuerpos de agua en general. La teledetección del *Color del Mar* se basa en la medición de la energía o radiación electromagnética proveniente del océano en la región del visible y del infrarojo cercano (de allí su nombre). En la figura 2.2 se puede ver una representación del espectro electromagnético en donde se resalta la región del visible.

Si bien su nombre se debe a razones históricas, ya que en sus orígenes estaba orientada al estudio de mares y océanos, sus principios son aplicables incluso a cuerpos de aguas interiores como lagos o lagunas. Esta técnica fue diseñada para detectar y cuantificar las tendencias en las propiedades biogeoquímicas del océano a escala global, estimar la producción del fitoplancton y estimar el tipo y la concentración de otras sustancias presentes en el agua. Esto se logra a partir del estudio de la variación espectral y magnitud de la radiancia en las mediciones realizadas por el sensor. Entre otras aplicaciones de las observaciones de *color del mar* están el monitoreo de la calidad del agua, el rastreo del transporte de sedimentos costeros, la detección de floraciones algales nocivas, el control de pesquerías sostenibles y actividades de acuicultura. Estas aplicaciones son relevantes para evaluar estudios de ecosistemas oceánicos, ciclos de carbono, mapeo de hábitats marinos, peligros costeros y monitoreo del cambio climático. En la figura 2.3 podemos ver un ejemplo del Mar Argentino.

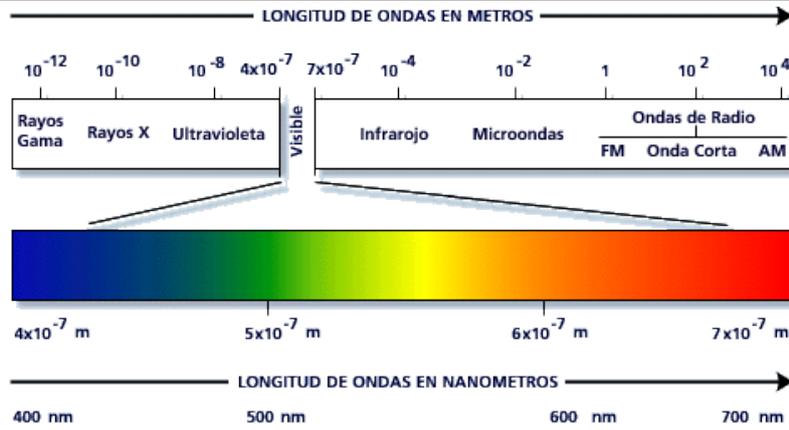


Figura 2.2: Espectro electromagnético, en donde se resalta la región del visible. Extraída de [6]

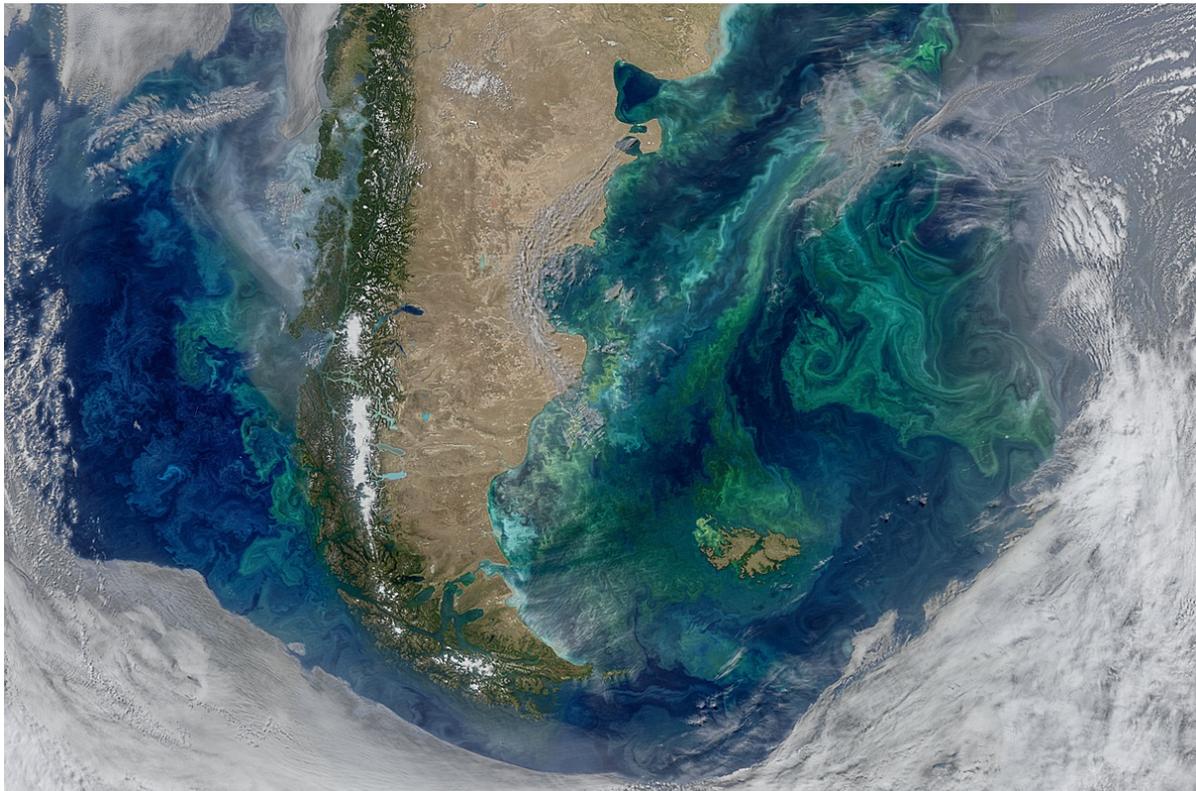


Figura 2.3: Imagen de la patagonia captada por el sensor MODIS-Aqua , 4 de febrero de 2019. Extraída de <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/gallery/619/>

### 2.2.1. Principios físicos y definiciones

En teledetección el objetivo básico y principal es poder *mirar* un objeto de estudio mediante sensores que captan radiación electromagnética (REM), reflejada o emitida por el objeto en distintos rangos del espectro y en función de estas mediciones obtener la información buscada. En este trabajo, el objeto de estudio será el océano y la radiación emergente deberá hacer un recorrido desde su origen hasta el sensor, por lo cual deberá interactuar con la atmósfera que se interpone entre ambos.

En la región del visible la atmósfera interactúa de diversas formas en la radiación debido a su variada composición. Está compuesta principalmente por gases como nitrógeno molecular (78.1%), oxígeno molecular (20.9%) y pequeñas cantidades de argón (0.93%), dióxido de carbono, vapor de agua, neón, helio, criptón, hidrógeno, ozono, entre otros. Además, se encuentran partículas de mayor tamaño, comparables con las longitudes de onda de la radiación en el visible e infrarrojo cercano, denominados aerosoles. A partir de un entendimiento de las interacciones de la radiación con estos constituyentes es que se puede remover la influencia de la atmósfera en observaciones de la tierra y de las superficie del océano, así

como también, monitorear parámetros atmosféricos y condiciones climáticas [1]. Nos vamos a limitar a considerar sólo los fenómenos físicos necesarios para entender las técnicas de la teledetección del *color del mar*.

Pensemos en un sensor montado en un satélite en el tope de la atmósfera (TOA) que *mira* el océano, como será en nuestro caso. El sensor mide radiación electromagnética o energía que se refleja o es emitida por objetos y llega desde una dada dirección por unidad de tiempo y de área. Esta cantidad se conoce como **radiancia**. Además, el sensor sólo capta una fracción del flujo total de energía dado que tiene tamaño finito y un campo limitado de observación determinado por su geometría.

### Algunas definiciones

Resulta útil definir ciertas cantidades de energía que son habitualmente usadas en área, como las que se detallan a continuación:

- Flujo radiante ( $\Phi$ ) : radiación o energía por unidad de tiempo, esta se mide en unidades de potencia, Watts [W] y es la energía total que se transporta en el sistema .
- Irradiancia (E): flujo radiante por unidad de área [ $W m^{-2}$ ].
- Radiancia (L): flujo radiante por unidad de área por unidad de ángulo sólido [ $W m^{-2} sr^{-1}$ ].

La irradiancia puede dividirse en una componente ascendente y otra descendente, siendo estas las medidas de toda la REM que sale y de toda la que llega a una superficie, respectivamente. Así como la irradiancia, la radiancia también puede dividirse en una componente ascendente ( $L_u$ ) y una descendente ( $L_d$ ). En la figura 2.4 se muestra la geometría asociada a la radiancia ascendente. Allí,  $dS$  es el diferencial de área,  $L(\theta, \phi)$  es la radiancia que emerge de  $dS$  con un ángulo cenital  $\theta$  (relativo a la normal de la superficie) y un ángulo acimutal  $\phi$ . Su valor es definido por el flujo radiante  $d\Phi$  que sale de  $dS$  dentro del ángulo sólido  $d\Omega$ , centrado en la línea definida por  $\theta$  y  $\phi$ .

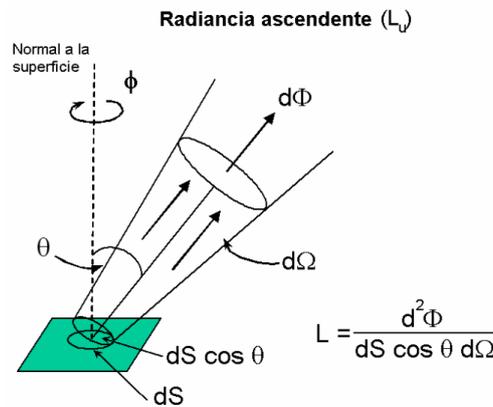


Figura 2.4: Geometría asociada a la definición de radiancia superficial ascendente. Extraída de [2]

### Geometría de observación

La geometría de observación del satélite será de suma importancia, dado que los ángulos de esta serán los que determinarán la radiancia que llegue al sensor. Se esquematiza en la figura 2.5. El ángulo  $\theta_v$  es el ángulo cenital de visión del sensor, caracteriza la radiancia  $L$  que llega al satélite y corresponde a la dirección en la que viaja la REM medido desde el cenit.  $\theta_s$  es el ángulo cenital solar y  $\phi$  el ángulo acimutal relativo entre el sol y el satélite ( $\phi_s - \phi_v$ ).

### Radiancia normalizada

Se normaliza la radiancia con el objetivo de transformar una medición de la radiancia en TOA de manera que pueda compararse con una medición estándar realizada in situ en el océano (medición realizada a nivel del océano), para cualquier ángulo cenital solar, dirección de observación, condiciones

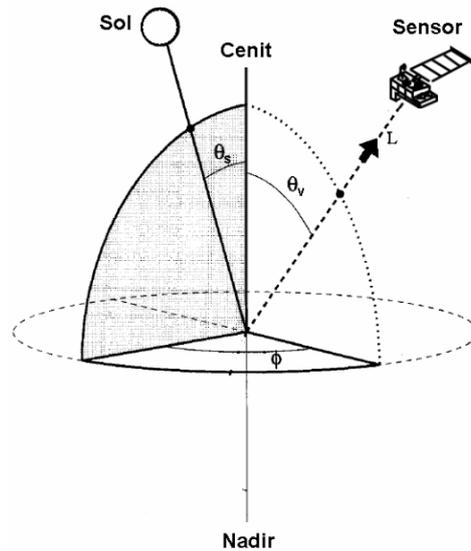


Figura 2.5: Vista esquemática de la geometría de observación. Extraída de [6].

atmosféricas y estado de las olas que hayan ocurrido en el momento de la medición satelital. Definiremos la radiancia normalizada emergente del agua  $[L_w]_N$  como la radiancia que mediría un sensor si, el sol se encontrara en el cenit ( $\theta_s = 0$ ), no hubiera pérdida por interacción con la atmósfera y la Tierra se encontrara a distancia media del Sol. Es decir, según [5]:

$$[L_w(\lambda, \theta_v, \phi_v)]_N = \frac{L_w(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi_v)}{\cos \theta_s \cdot t(\theta_s)}, \quad (2.1)$$

donde  $t(\theta_s)$  es la transmitancia difusa para la irradiancia del sol en dirección del sol para las condiciones atmosféricas dadas, concepto que se retomará más adelante.

Se agrega un factor de corrección para la distancia de la tierra respecto al sol al momento de la medición, así queda:

$$[L_w(\lambda, \theta_v, \phi_v)]_N = \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \frac{L_w(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi_v)}{\cos \theta_s \cdot t(\theta_s)}, \quad (2.2)$$

donde  $R$  es la distancia entre la tierra y el sol al momento de la medición y  $R_0$  es la distancia media. Es necesario tener en cuenta esta corrección dado que, a causa de la órbita elíptica que posee la tierra, la radiancia a TOA puede llegar a variar hasta un 8% [6]. Notemos que esta radiancia normalizada sigue dependiendo del ángulo de observación.

## Reflectancia

En el marco del sensoramiento remoto es común trabajar en términos de reflectancia, la cual es adimensional. La reflectancia en general, se define como [8]:

$$\rho = \frac{\pi L}{F_0 \cos(\theta_s)}, \quad (2.3)$$

donde  $L$  es la radiancia a tope de atmósfera medido por el sensor,  $F_0$  es la irradiancia solar extraterrestre y  $\theta_s$  es el ángulo cenital del sol. En otras palabras es el cociente entre la irradiancia reflejada y la incidente. Se define, de igual manera que en el caso de la radiancia, la reflectancia emergente del agua normalizada  $[\rho_w]_N$  como:

$$[\rho_w]_N = \frac{\pi [L_w]_N}{F_0} \quad (2.4)$$

Así, teniendo en cuenta (2.1) y (2.3), tenemos:

$$\rho_w(\lambda) = [\rho_w]_N(\lambda) \cdot t(\theta_s, \lambda) \quad (2.5)$$

Como sabemos, la radiancia que llega a nuestro satélite ha sufrido muchas interacciones con la atmósfera. Esto se traduce en que la radiancia que capta el sensor no proviene solo del objeto que queremos estudiar si no que posee contribuciones de distintas fuentes, incluso otros fenómenos superficiales, que no son de interés. Uno de los principales problemas es precisamente saber cuál es la contribución de cada una de estas componentes.

En el capítulo 3 nos explayaremos sobre este y las correcciones atmosféricas necesarias. En el resto de esta sección describiremos cualitativamente cada una de las interacciones de la radiación con la atmósfera y luego nos adentraremos en la descripción del proceso completo de transferencia radiativa, que es aquel que contempla todas las fuentes que aportan a la radiancia que llega al sensor y los cambios que esta sufre.

### 2.2.2. Interacción de la radiación con la atmósfera

A continuación describiremos algunos de los efectos que ocurren en la atmósfera cuando interactúa con la radiación y que son de interés en este trabajo.

#### Absorción

La absorción es un proceso en el cual la energía radiante se transforma en calor o en enlaces químicos. La absorción de la atmósfera es causada principalmente por gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el oxígeno y por los aerosoles presentes en la misma. Cada uno de los constituyentes absorbe en cierto rango del espectro electromagnético, dando así lugar a lo que se conoce como ventanas atmosféricas que son aquellos intervalos en el espectro donde la radiación puede pasar sin sufrir grandes deterioros de su intensidad, es decir de manera que los sensores siguen siendo sensibles a esta. Se pueden observar estas ventanas en la figura 2.6 donde se presenta la absorción que es una medida de la atenuación de una radiación al atravesar una sustancia. Las bandas espectrales de los sensores se ubican en estas ventanas atmosféricas para maximizar la energía que puedan recolectar.

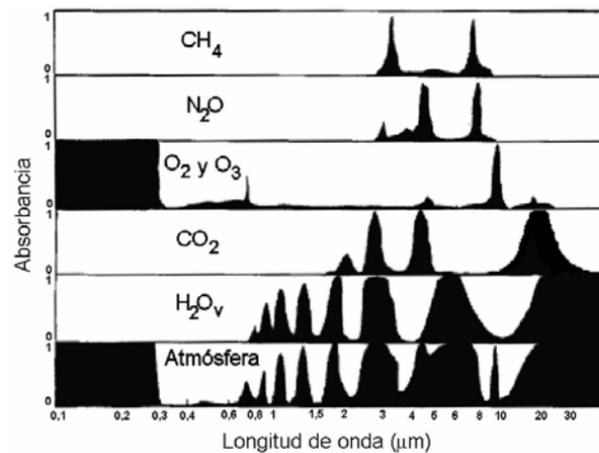


Figura 2.6: Absorbancia de la atmósfera y los gases que la componen en función de la longitud de onda. Extraída de [2]

#### Dispersión

La dispersión es el fenómeno producido al interactuar la radiación con las moléculas o aerosoles presentes en la atmósfera.

Dependiendo de si la dispersión es causada por la interacción de radiación con moléculas o con aerosoles es que se definen dos clases de dispersión:

- **Dispersión de Rayleigh o molecular:** esta dispersión ocurre cuando la radiación interactúa con moléculas, las cuales tienen un tamaño menor a la longitud de onda de la radiación incidente. Esto está

bien desarrollado en el modelado matemático de dispersión de Rayleigh [5]. La dispersión es proporcional a  $\lambda^{-4}$ , siendo así mayor la dispersión en longitudes de onda bajas como el caso del azul. Un rasgo característico de esta dispersión es que su distribución angular es totalmente simétrica [2], es decir la radiación se dispersa de igual manera hacia adelante como hacia atrás respecto a la dirección de incidencia(figura 2.7).

- **Dispersión de Mie o por aerosoles:** esta dispersión tiene lugar cuando la partícula tiene un tamaño comparable con la longitud de onda de la radiación incidente. No nos explayaremos en el desarrollo de esta teoría, pero es necesario tener en cuenta que la REM se dispersa de una manera mas compleja al interactuar con aerosoles en comparación con moléculas haciendo mas difícil modelar y quitar su influencia en la radiación total. Estas dispersiones suelen ser causadas por sustancias solubles en agua (amonio y sulfato de calcio, así como también compuestos orgánicos) y partículas de polvo suspendidas en el aire. La dispersión de Mie, a diferencia de la dispersión de Rayleigh, es asimétrica y la mayor parte de la radiación es dispersada hacia delante respecto a la dirección de incidencia de la luz (figura 2.7).[5, 2]



Figura 2.7: Características de las dispersiones Rayleigh (simétrica) y Mie (asimétrica) según el tamaño de las partículas respecto a la longitud de onda de la radiación incidente. Extraída de [2]

### 2.3. Características de la Misión SABIA-Mar

En esta sección describiremos los aspectos generales la misión satelital SABIA-Mar como así también sus instrumentos y las particularidades en su geometría de observación. Como parte de la misión, actualmente se está construyendo el satélite SABIA-Mar y se están desarrollando todos los algoritmos que van a permitir el procesamiento en Tierra de la información que éste genere. El satélite SABIA-Mar va a tener instrumentos a bordo que lo hacen principalmente un satélite para la medición del *color del mar*. La órbita de SABIA-Mar será del tipo polar heliosincrónica, lo cual permite una cobertura global del planeta. Además, tendrá una revisita de dos días en la región del mar Argentino.

#### Instrumentos a bordo de SABIA-Mar

Los instrumentos que conforman la carga útil del SABIA-Mar se encuentran categorizados en primarios y secundarios, siendo los primeros aquellos que permiten proporcionar información directamente relacionada con el objetivo central de la misión SABIA-Mar, es decir, con la medición del *color del mar*, mientras que los secundarios proporcionarán datos complementarios a dicho objetivo [11]. Los instrumentos primarios son:

- Cámara VIS-NIR (rango visible-infrarrojo cercano): cámara óptica de 11 bandas cubriendo el rango desde los 412 nm hasta los 865 nm. Resolución espacial de 200 m en costas y 800 m en mar abierto.
- Cámara NIR-SWIR (rango infrarrojo cercano - infrarrojo onda corta): cámara óptica de 6 bandas cubriendo el rango desde 750 nm hasta 1600 nm. Resolución espacial de 400 m en costas y 800 m en mar abierto.

Ambas cámaras se utilizaran para observar el *color del mar*, realizar estudios marítimos y costeros y brindar apoyo a las aplicaciones en tierra.

Los instrumentos secundarios son:

- DCS: sistema de recolección de datos. Colecta datos ambientales y meteorológicos desde el terreno.
- HSC: cámara de alta sensibilidad pancromática en el rango de los 450 nm a 800 nm. Se utilizara para captar imágenes de luces nocturnas y detección de buques poteros en el mar, entre otras.
- Receptor GNSS: unidad receptora del sistema global de navegación por satélite. Es una carga de desarrollo tecnológico.

La cámaras principales de SABIA-Mar son dos cámaras multispectrales tipo escobillón o *pushbroom*, que consiste de un montaje de varios EOMs (módulos electro-ópticos) con distintos ángulos de observación (Figura 2.8). El diseño de las cámaras SABIA-Mar incluye 3 módulos electro-ópticos (EOMs) idénticos dispuestos en forma de abanico para cumplir con el campo visual requerido a lo largo de un ángulo de visión de 90 grados, que al proyectarse sobre la superficie de la tierra abarcan un ancho de barrido de 1.495 km en dirección este-oeste, como se muestra en la figura 2.9.

### Geometría de observación de SABIA-Mar

Una particularidad de las cámaras de SABIA-Mar es que el plano focal está compuesto por un detector multilínea en el cual se montan los filtros espectrales de las bandas de modo tal que cada sensor se proyecta al suelo a través de un plano de observación diferente y la superficie terrestre es observada con un ángulo distinto<sup>1</sup> por cada banda. Para simplificar, la figura 2.9 muestra los planos de observación de las bandas extremas (planos verde y rojo) y el plano más cercano a nadir (plano amarillo) únicamente. La información multispectral se recupera luego mediante una combinación espacial entre todas las bandas. Como resultado, el ángulo entre las direcciones de observación de las bandas extremas no es despreciable, siendo de unos 19.5°, y permanece casi constante a lo largo del ancho de barrido con variaciones que no afectarán los análisis realizados en este trabajo. [12].

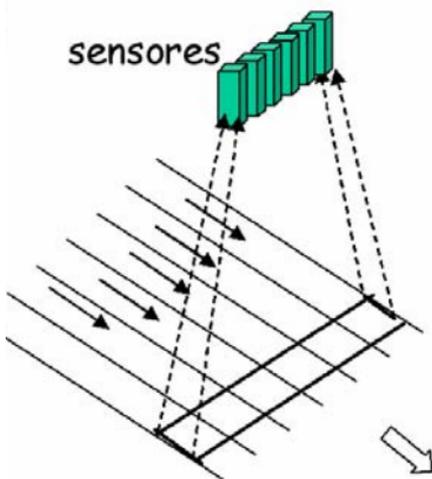


Figura 2.8: Tipo de sensor *push-broom* utilizado en el satélite SABIA-Mar. Observamos los planos frontal (fore), central y posterior (after). Extraído de [2]

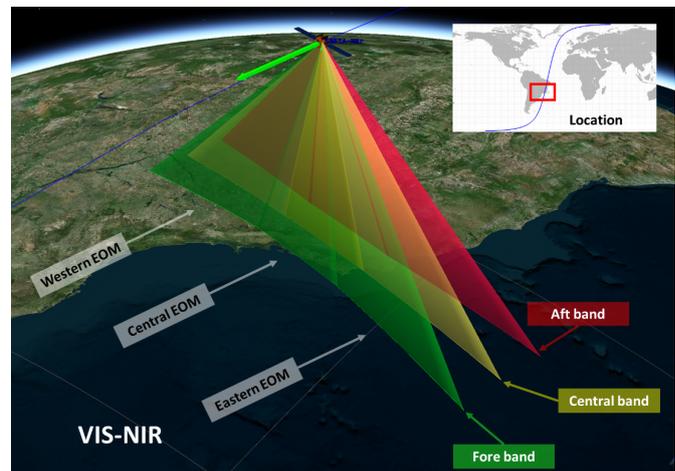


Figura 2.9: Campo de visión de la cámara VIS-NIR de SABIA-Mar. Extraído de [12]

### Generación de productos del Color del Mar de SABIA-Mar

La misión SABIA-Mar generará operativamente ciertos productos que son de gran interés para la comunidad científica, y a partir de los cuales se pueden obtener a su vez otros productos de valor agregado [6]:

<sup>1</sup>Ángulo distinto respecto al plano transversal a la trayectoria.

- Radiancia normalizada emergente del agua en las bandas del visible  $[Lw]_N(\lambda)$   $[W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}]$ : es la radiancia proveniente de la superficie del agua normalizada a aquella que mediría un sensor si el sol estuviera en el cenit, sin atenuación causada por la atmósfera y cuando la Tierra se encuentra a distancia media del Sol. Es la variable básica a partir de la cual se pueden obtener muchas otras relacionadas a la composición del agua. Esta variable se obtiene luego del proceso de correcciones atmosféricas en el cual nos estamos concentrando en este trabajo.
- Concentración de Clorofila-a (Chl-a)  $[mg \cdot m^{-3}]$ : concentración total de clorofila-a a poca profundidad, es decir justo por debajo de la superficie. Esta variable es un indicador de la cantidad de fitoplancton en el mar y por lo tanto está relacionada a la productividad primaria.
- Coeficiente de Atenuación Difusa a 490 nm ( $K_d(490)$ )  $[m^{-1}]$ : coeficiente de atenuación de la luz difusa incidente, es decir, la inversa de la escala vertical de longitud (longitud de atenuación exponencial) de la reducción de irradiancia incidente en la longitud de onda 490nm. Es un indicador de la penetración de la luz en el agua, relacionada a su vez con la cantidad de sustancias presentes.
- Valor medio diario de la Radiación Disponible para Fotosíntesis (PAR)  $[Einstein \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}]$ : es el promedio diario de la radiación disponible para fotosíntesis en la superficie del océano, la cuál se define como el flujo de energía cuántica justo por encima de la superficie del agua procedente del Sol en el rango de 400 a 700 nm.
- Turbidez (T): es un indicador de la calidad del agua. Es una medida cuantitativa de la radiación difusa basada en la norma ISO (International Standard Organization) 7027. En términos ópticos más precisos, esta es una medida a 860 nm de la relación entre la luz dispersada a 90° y la luz transmitida hacia adelante, en comparación con el mismo ratio para una suspensión de formazina (C2H4N2).

En la tabla 2.1 podemos observar las bandas espectrales de las cámaras del satélite de SABIA-Mar y sus respectivas aplicaciones.

$\lambda$ [nm]	Ancho de banda [nm]	Aplicaciones científicas
412	10	Materia orgánica disuelta coloreada y concentración de clorofila.
443	10	Absorción máxima de Chl-a.
490	10	Chl-a y otros pigmentos.
510	10	Chl-a, turbidez, mareas rojas y absorción del O3.
555	10	Algoritmos bio-ópticos y turbidez.
620	10	Cianobacterias, ficocianina, sedimentos en suspensión y turbidez.
665	10	Chl-a, línea base de la señal de fluorescencia y turbidez.
680	10	Chl-a y pico de línea de fluorescencia (FLH).
710	10	FLH, detección de floraciones algales nocivas, Chl-a en aguas muy turbias, corrección atmosférica en aguas turbias.
750	10	Corrección atmosférica mar abierto.
765	10	Corrección atmosférica mar abierto, altitud de aerosoles, absorción molecular y altitud de nubes.
865	20	Corrección atmosférica mar abierto, referencia de vapor de agua sobre el océano y turbidez.
1044	20	Corrección atmosférica en aguas turbias y turbidez.
1240	60	Corrección atmosférica en aguas turbias y turbidez.
1610	900	Corrección atmosférica aguas en turbias.
400-700	300	Detección de luces nocturnas

Cuadro 2.1: Bandas espectrales de las cámaras del satélite de SABIA-Mar y sus respectivas aplicaciones científicas. Datos extraídos de [6]

Este trabajo está principalmente enfocado en los productos satelitales que generará la cámara VIS-NIR a bordo de SABIA-Mar, específicamente en la Radiancia Normalizada emergente del Agua  $[Lw]_N(\lambda)$ . Esta cantidad será derivada del algoritmo de corrección atmosférica que describiremos en el próximo capítulo.

## Capítulo 3

# Algoritmo de correcciones atmosféricas

En este capítulo describiremos el algoritmo desarrollado para recuperar la radiancia que emerge del agua a partir de las mediciones del sensor a TOA , o lo que es equivalente, realizar la corrección atmosférica. Desarrollaremos para un caso estándar en donde la geometría de observación es similar para todas las bandas y luego pasaremos al caso particular de SABIA-Mar. La propuesta de SABIA-Mar estará basada en el algoritmo desarrollado por Gordon y Wang [9], por lo que nos centraremos en él. Este algoritmo fue implementados en varios de los satélites de *color del mar* operativos, tales como el pasado SeaWiFS, los actuales MODIS y VIIRS, y el futuro PACE, de la Agencia Espacial Estadounidense NASA [5]. Dado que en la corrección debida a la dispersión por aerosoles es en la que más influye la geometría multi-angular particular de SABIA-Mar[12], se pondrá más énfasis en este fenómeno y se explicará brevemente como se corrigen el resto de los términos de la ecuación de transferencia radiativa.

### 3.1. Ecuación de transferencia radiativa

El sensor, como se mencionó anteriormente, recibe una señal en donde la mayor parte de la radiancia no proviene del cuerpo de agua. La radiancia a TOA captada por el satélite se puede separar linealmente en varios términos [9] correspondientes a distintas contribuciones físicas, tales como la dispersión producida por la interacción de la radiación con las moléculas y de aerosoles de la atmósfera, el reflejo especular del sol y la espuma marina. Este proceso se esquematiza en la figura 3.1, donde se representa a modo de ejemplo una molécula de nitrógeno ( $N_2$ ) y las partículas de aerosoles (partícula marrón) con sus correspondientes contribuciones de radiancia ( $L_R$ ,  $L_{Ra}$  y  $L_a$ ).  $L_{gs}$  es la radiancia debido a la reflexión especular sobre el agua (*sun glint*), que sufre dispersiones en su paso por la atmósfera y llega finalmente al sensor. La contribución debida a la interacción de la radiancia con los componentes del agua, que es la incógnita para el estudio del color del mar, se representa como  $L_w$ .

Se puede expresar matemáticamente estas contribuciones para cada longitud de onda  $\lambda_i$  en lo que se conoce como ecuación de transferencia radiativa. Si bien puede expresarse de varias maneras, en este trabajo adoptaremos la propuesta en [9] y [5] y está dada por la siguiente expresión:

$$L_{toa}(\lambda_i) = L_R(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + L_{Ra}(\lambda_i) + T_d \cdot L_g(\lambda_i) + t_d \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t_d \cdot L_w(\lambda_i) \quad (3.1)$$

Finalmente, valiéndonos de la equivalencia entre  $L_{toa}$  y  $\rho_{toa}$ , la ecuación de transferencia radiativa en cada banda espectral del visible se puede expresa de la siguiente manera:

$$\rho_{toa}(\lambda_i) = t_d \cdot \rho_w(\lambda_i) + \rho_r(\lambda_i) + \rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i) + T_d \cdot \rho_g(\lambda_i) + t_d \cdot \rho_{wc}(\lambda_i). \quad (3.2)$$

Definamos todas las magnitudes que intervienen en esta ecuación:

- $\rho_{toa}$ : reflectancia al tope de atmósfera, es la magnitud total que mide el satélite.
- $\rho_w$ : reflectancia que emerge de la superficie del agua, producto de la radiación incidente y de todas las interacciones que ocurren dentro del agua. Esta magnitud nos da información esencial sobre la composición del agua. Esta es la magnitud que queremos obtener luego del proceso de corrección atmosférica, es decir, es nuestra incógnita.

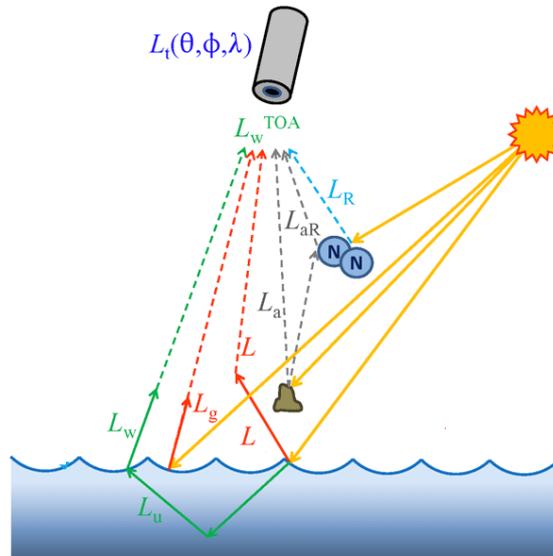


Figura 3.1: Contribuciones a la radiancia a tope de atmósfera medida por el sensor a bordo del satélite. La notación corresponde a lo definido en ec. (3.1). Extraída de [5].

- $\rho_r$  : reflectancia debido a dispersión de luz con moléculas conocida como *dispersión de Rayleigh*, es causada por la interacción de la radiación con las moléculas de los gases presentes en la atmósfera, las cuales tienen tamaños mucho menores a la longitud de onda del visible. Esta dispersión es proporcional a  $\lambda^{-4}$ . Se modela de la manera usual en teledetección del *color del mar*, como veremos mas adelante.
- $\rho_a$  : reflectancia debido a dispersión de luz con aerosoles o partículas grandes (Dispersión de Mie), es producto de la interacción de la radiancia con partículas que tienen un tamaño comparable con las longitudes de onda. En esta magnitud es donde pondremos el foco debido al impacto que tiene sobre la geometría de SABIA-Mar.
- $\rho_{ra}$  : reflectancia debido a dispersión de luz con moléculas y aerosoles. Corresponde al haz de luz que sufrió interacciones tanto con moléculas como con aerosoles.
- $\rho_g$ : reflectancia debido a la reflexión especular de la luz directa con el cuerpo de agua (Sunlint). Esta cantidad se modela y en algunos casos se enmascara, como veremos mas adelante en esta sección, ya que las imágenes con presencia de altos niveles de sunlint no son útiles para el estudio de la superficie del mar.
- $\rho_{wc}$ : reflectancia debido a la espuma marina (Whitecaps), y se refiere a la contribución de la espuma presente en las crestas de olas a la reflectancia de la luz en la superficie del mar. Se modela teniendo en cuenta que depende fuertemente del viento sobre la superficie.
- $T_d$  : transmitancia directa, es el factor de atenuación de la radiación que llega al sensor directamente sin ser dispersada en el camino.
- $t_d$  : transmitancia difusa, es el factor de atenuación de la radiación que llega al sensor luego de sufrir una o más dispersiones con la atmósfera presente en el camino.

### 3.2. Correcciones atmosféricas en la región del visible

Notemos que, desde el punto de vista de la teleobservación del *color del mar*, la variable que se desea estimar es la radiancia emergente del mar  $L_w$  para cada longitud de onda (banda espectral) del sensor, a partir de la medida por el satélite  $L_{toa}$ . Este proceso se conoce como *corrección atmosférica*, y cuyo principal desafío es la estimación y eliminación de las componentes  $L_a$ ,  $L_r$  y  $L_{ra}$ . Estas componentes

contribuyen aproximadamente al 90 % de la radiancia TOA, mientras que  $L_w$  aporta el 10 % en el mejor de los casos. El término correspondiente al *sun glint*  $L_g$  puede reducirse tanto como se desee evitando la región que rodea la imagen especular del sol. Por otro  $L_{wc}$  es la contribución de la espuma marina y puede estimarse a partir de la velocidad del viento en la superficie [10]. Es importante destacar que el efecto de la reflexión solar especular está siempre presente, incluso en pequeñas cantidades, debido a la rugosidad en la superficie causada por la velocidad del viento, las cuales deben corregirse [6].

El proceso de correcciones atmosféricas para obtener la radiancia que emerge del mar a partir de la medición satelital de la radiancia que lleva a TOA consiste, en resumen, en resolver la ecuación 3.2. Esta resolución, en la práctica, se realiza modelando todos los términos conocidos con modelos que en general son empíricos. A continuación describiremos brevemente como se modelan los términos correspondientes a la dispersión por moléculas (Rayleigh), reflexión solar (*sun glint*) y a la reflectancia de la espuma de mar.

## Reflectancia de Rayleigh

La contribución de la reflectancia de Rayleigh puede ser calculada y tabulada. Para la misión SABIA-Mar, se generarán LUTs<sup>1</sup> específicos que contengan la información necesaria para reconstruir la radiancia de Rayleigh, estas tablas se pueden observar en [13]. Para calcular estas LUTs, en el caso general, se utiliza un modelo numérico para resolver la ecuación vectorial de transferencia radiativa (incluyendo todos los efectos de polarización) para gases atmosféricos. Estas LUTs contienen los componentes de Fourier a TOA, específicamente los primeros tres términos, del vector de Stokes normalizado [14] en función de la velocidad del viento y la geometría. Estos componentes están relacionados con la intensidad ( $I$ ) y la polarización de la luz. Además, estas LUTs guardan datos de entrada para los ángulos solares y de observación  $(\theta_s, \theta_v)$ , la contribución del *sun glint* ( $\sigma$ ), longitudes de onda centrales para las bandas de SABIA-Mar ( $\lambda$ ), el factor de despolarización molecular en el aire ( $\delta$ ) y el espesor óptico de Rayleigh  $\tau_{R_0}(P_0, \lambda)$  a presión atmosférica,  $P_0$ , modelado por Bodhaine (1999) [15]. Así, utilizando los primeros tres componentes de Fourier a TOA de  $I$ , que tiene unidades de radiancia, se logra una primera estimación de la radiancia de Rayleigh  $L_r$ :

$$L_r = I_0 + I_1 \cos(\Delta\phi) + I_2 \cos(2\Delta\phi)$$

Para introducir el efecto de la presión hay que tener en cuenta que, el espesor óptico de Rayleigh en el momento de la observación depende del número de moléculas de gas atmosférico entre la superficie del mar y la parte superior de la atmósfera, y este número de moléculas está directamente relacionado con la presión al nivel del mar [5]. Por lo tanto se realiza una corrección a  $\tau_{R_0}$  permitiendo explicitar la influencia de la presión al momento de la medición:

$$\tau_R(P, \lambda) = \frac{P}{P_0} \tau_{R_0}(P_0, \lambda)$$

y ahora si estimar correctamente la radiancia de Rayleigh según Wang (2005) [16], como;

$$L_r[\tau_R(P, \lambda)] = L_r[\tau_R(P_0, \lambda)] \times \frac{1 - \exp[-C(\lambda, M)\tau_R(P, \lambda)M]}{1 - \exp[-C(\lambda, M)\tau_R(P_0, \lambda)M]}$$

donde

$$M = \frac{1}{\cos\theta_s} + \frac{1}{\cos\theta_v}$$

es el factor geométrico de masa de aire y  $C(\lambda, M)$  es un factor a determinar, que se puede modelar como [5] :

$$C(\lambda, M) = a(\lambda) + b(\lambda) \ln M$$

<sup>1</sup>LUTs (Lookup Table en inglés) son tablas de búsqueda. Se utilizan para almacenar valores precalculados, generalmente con el propósito de acelerar la búsqueda y recuperación de datos en ciertas operaciones o cálculos. Puede contener valores precomputados que relacionan diferentes parámetros de entrada con valores corregidos, ajustados o de interés para ciertos escenarios específicos. En lugar de realizar cálculos repetitivos en tiempo real, se utilizan las tablas de búsqueda para encontrar rápidamente valores predeterminados que corresponden a determinadas entradas.

$$a(\lambda) = -0,6543 + 1,608\tau_R(P_0, \lambda)$$

$$b(\lambda) = 0,8192 - 1,2541\tau_R(P_0, \lambda)$$

Finalmente, utilizando los valores de radiancia a TOA,  $L_r(\tau_R(P, \lambda))$ , para cada  $\lambda$  de SABIA-Mar y luego, normalizando por el ángulo cenital del sol se obtienen las reflectancias a TOA debido al efecto Rayleigh [13]:

$$\rho_r = \frac{L_r(\tau_R(P, \lambda))}{\cos \theta_s}$$

Aunque la influencia de la geometría de SABIA-Mar en el factor M no es significativamente relevante, este efecto ha sido tenido en cuenta en la implementación del algoritmo de corrección atmosférica.

### Reflexión solar o sunglint $\rho_g(\lambda_i)$

Siguiendo los lineamientos de Gordon y Wang (1994)[9], se puede modelar el termino de sunglint,  $T_d \cdot \rho_g$ , como:

$$T_d \cdot \rho_g(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi_v, W_s) = F_0(\lambda) \exp\left(-(\tau_R(\lambda) + \tau_a(\lambda))\left(\frac{1}{\cos(\theta_s)} + \frac{1}{\cos(\theta_v)}\right)\right) \rho_{GN}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi, W_s)$$

Donde el termino de reflexión solar normalizada  $\rho_{GN}$  se estima siguiendo el enfoque de Cox and Munk (1954) [17, 18],  $F_0$  es la irradiancia extraterrestre solar,  $\tau_R$  y  $\tau_a$  corresponden al espesor óptico de Rayleigh y aerosoles respectivamente,  $\Delta\phi$  es el ángulo relativo azimutal entre el sol y el satélite y  $W_s$  corresponde a la velocidad del viento sobre la superficie del mar.

Se aplica un enmascarado con el fin de marcar píxeles fuertemente contaminados por la reflexión solar. Este procedimiento se lleva a cabo previo a realizar la corrección atmosférica en sí, ya que todo el algoritmo funciona adecuadamente para corregir píxeles *limpios o libres* de alto sunglint, vía un valor umbral. Si el término de reflexión solar estimado es mayor que cierto umbral, ese píxel se marca y la corrección atmosférica no se realiza. El valor del umbral se determinará a posteriori en el desarrollo del algoritmo de corrección atmosférica, y podría cambiar según cuán estricto se desee que sea el enmascaramiento.

Es importante notar que, aunque en el modelo estándar podemos tomar cualquier banda indistintamente para establecer el valor umbral, en el caso de SABIA-Mar debemos tener en cuenta que cada banda tiene su propio ángulo de visión,  $\theta_v^i$  (donde  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{bandas}}$  son las bandas de SABIA-Mar), teniendo una diferencia de aproximadamente  $20^\circ$  entre la primera ( $i = 1$ ) y la última ( $i = N$ ) banda. De esta manera, para SABIA-Mar, alguna banda  $i$  podría estar contaminada con sunglint mientras que las demás no, debido a la naturaleza geométrica de este efecto [6].

### Reflectancia de la espuma de mar $\rho_{wc}(\lambda_i)$

La reflectancia de la espuma de mar  $\rho_{wc}(\lambda_i)$  se modela utilizando el modelo empírico creado por [19], el cual solo requiere la velocidad del viento,  $W_s$ , como entrada. Además de la velocidad del viento, el modelo es una función de  $\lambda$ , a través del factor  $a_{wc}(\lambda)$ , el cual se encuentra tabulado en [19].  $a_{wc}(\lambda)$  es una tabla que contiene la reflectancia normalizada de la espuma .

El modelo para  $\rho_{wc}(\lambda, W)$  es entonces:

$$\rho_{wc}(\lambda, W_s) = \begin{cases} 0 & \text{si } W_s \leq 6,33 \text{ m/s} \\ 1,925 \times a_{wc}(\lambda) \times 10^{-5}(W - 6,33)^3 & \text{si } 6,33 \text{ m/s} < W_s < 12 \text{ m/s} \\ 1,925 \times a_{wc}(\lambda) \times 10^{-5}(12,0 - 6,33)^3 & \text{si } W_s > 12 \text{ m/s} \end{cases}$$

Como podemos ver, este modelo satura para  $W_s = 12\text{m/s}$ , es decir, para  $W_s > 12\text{m/s}$  el algoritmo no depende de la velocidad del viento.[6]

## Corrección de la dispersión por aerosoles

Con la estimación de los términos previamente mencionados, podemos despejar los términos conocidos de la ecuación (3.2):

$$t_d \cdot \rho_w(\lambda_i) + \rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i) = \rho_{toa}(\lambda_i) - \rho_r(\lambda_i) - T_d \cdot \rho_g(\lambda_i) - t_d \cdot \rho_{wc}(\lambda_i) \quad (3.3)$$

Como consecuencia, quedan por estimar la reflectancia proveniente del agua, dispersión con aerosoles y dispersión con aerosoles-moléculas. Es decir:

$$\rho_{incógnita}(\lambda_i) = t_d \cdot \rho_w(\lambda_i) + \rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i) \quad (3.4)$$

El próximo paso consiste en calcular los términos correspondientes  $\rho_a(\lambda_i)$  y  $\rho_{ra}(\lambda_i)$ , para así finalmente poder despejar  $\rho_w(\lambda_i)$ . Usualmente a esta suma se la llama  $\rho_{path} = \rho_a(\lambda_i) + \rho_{ra}(\lambda_i)$ .

Son los más difíciles de estimar y que más contribuyen a la reflectancia en TOA. Esto se debe a la dispersión por aerosoles y al hecho de que la interacción entre la dispersión de Rayleigh y aerosoles es difícil de predecir a priori, ya que su concentración y propiedades ópticas son desconocidas (y muy variables) para la imagen tomada. Por lo tanto, normalmente se utilizan bandas espectrales donde se conocen los valores de  $\rho_w$ .

Primero notemos que en el camino óptico que recorre la radiación en estos casos, sufre una o más dispersiones, ya sea con aerosoles y/o moléculas. Notar que en  $\rho_{ra}$  es necesariamente una dispersión múltiple mientras que en  $\rho_a$  se da una única dispersión.

Para tener en cuenta el efecto de varias dispersiones se requieren modelos de aerosoles más complejos, se simplifica el procedimiento de la siguiente manera. Dada una geometría, definimos la reflectancia de dispersión múltiple (multiple scattering) como  $\rho_{ms} = \rho_{path} = \rho_{ra}(\lambda_i) + \rho_a(\lambda_i)$  y esta expresión se ajusta a un polinomio de segundo orden en la reflectancia de aerosol de dispersión única  $\rho_a$ . [6]

$$\ln(\rho_{ms}(\lambda_i)) = a \ln^2(\rho_a(\lambda_i)) + b \ln(\rho_a(\lambda_i)) + c \quad (3.5)$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes incluidas en las LUTs.

Por lo tanto solo nos tenemos que concentrar en la estimación de  $\rho_a(\lambda_i)$  ya que con esta es posible derivar  $\rho_{ms}(\lambda_i)$ . A partir de aquí trabajaremos siguiendo el algoritmo de Gordon y Wang [9], el cual hace la suposición de que solo ocurre dispersión única, es decir supone  $\rho_{ra} = 0$  (en realidad este término será corregido luego mediante lo previamente detallado). Entonces retomando de (3.4) tenemos que

$$\rho_{incógnita}(\lambda_i) = t_d \cdot \rho_w(\lambda_i) + \rho_a(\lambda_i) \quad (3.6)$$

Volvemos a la tarea de estimar  $\rho_a(\lambda_i)$ . Para aguas del Caso 1, aquellas con bajas concentraciones de clorofila y sin sedimentos, la radiancia que emerge del agua en longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR), es decir aproximadamente 700 nm, es despreciable. Para tales aguas, se puede asumir que  $\rho_w(\lambda > 700nm) = 0$ , lo que se conoce como **suposición de píxel negro**.

Para lograr estimar la contribución por aerosoles se necesitan al menos dos bandas: una para estimar la contribución de los aerosoles y otra para estimar cuánto varía esta contribución con la longitud de onda. Sean  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  dos longitudes de onda del NIR, con  $\lambda_1 < \lambda_2$ . En estas dos longitudes de onda, la reflectancia en TOA (corregida como se muestra en la Ecuación (3.3)) se debe enteramente a la radiancia del camino óptico en la atmósfera, es decir  $\rho_{incógnita}(\lambda_i) = \rho_a(\lambda_i)$ ,  $i = 1, 2$ .

$$\rho_a(\lambda_i) = \rho_{toa}(\lambda_i) - \rho_r(\lambda_i) - T_d \cdot \rho_g(\lambda_i) - t_d \cdot \rho_{wc}(\lambda_i) \quad (3.7)$$

así para  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  longitudes de onda NIR podemos estimar  $\rho_a(\lambda_i)$ .

Para determinar  $\rho_a(\lambda)$  para cualquier  $\lambda$ , se define el parámetro epsilon de dispersión [9], como:

$$\varepsilon(\lambda_1, \lambda_2) \equiv \frac{\rho_a(\lambda_1)}{\rho_a(\lambda_2)} \quad (3.8)$$

La cantidad  $\varepsilon(\lambda_1, \lambda_2)$ , y más generalmente la cantidad  $\varepsilon(\lambda, \lambda_2)$  para cualquier  $\lambda < \lambda_2$ , depende del tipo de aerosol, el cual es determinado por el tipo de partícula y la humedad relativa. Se utiliza para estimar la contribución de los aerosoles y cuanto varía con la longitud de onda.

Supongamos queremos determinar  $\rho_a(\lambda_3)$  donde  $\lambda_3$  es una longitud de onda en el visible. Sean  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  bandas en NIR, los pasos a seguir son:

1. Calcular la dependencia de  $\varepsilon^i(\lambda, \lambda_2)$  con la longitud de onda  $\lambda$  para estimar cuánto varía la contribución de aerosoles para los diferentes modelos de aerosoles ( $i= 1, 2, \dots$ ) que se utilizarán [9]. El parámetro de dispersión  $\varepsilon^i(\lambda, \lambda_2)$  depende también de los demás parámetros ambientales atmosféricos, y de los ángulos solares y dirección de observación. Notar que es una extrapolación que se extiende hasta la región del visible y se realiza para cada modelo de aerosol.
2. Con los valores calculados mediante la ec. (3.7) (que son los valores conocidos, los datos),  $\rho_a(\lambda_2)$  y  $\rho_a(\lambda_1)$ , se calcula el parámetro épsilon de dispersión y comparando con los distintos  $\varepsilon^i(\lambda, \lambda_2)$  se selecciona el modelo de aerosol que mejor se adecue. Supongamos que este es el modelo k.
3. Por ultimo, ya con el modelo de aerosol definido, puedo despejar de (3.8)  $\rho_a(\lambda_3) = \rho_a(\lambda_2)\varepsilon^k(\lambda_3, \lambda_2)$  para  $\lambda_3$ .

Así podemos estimar  $\rho_a(\lambda_i)$  y con esta magnitud ya podemos estimar  $\rho_w$  mediante:

$$\rho_w(\lambda_i) = \frac{1}{t_d} (\rho_{toa}(\lambda_i) - \rho_r(\lambda_i) - T_d \cdot \rho_g(\lambda_i) - t_d \cdot \rho_{wc}(\lambda_i) - \rho_a(\lambda_i) - \rho_{ra}(\lambda_i)), \quad (3.9)$$

donde  $\rho_{ra}(\lambda_i)$  se obtiene de ec.3.5, logrando así el objetivo final de la corrección atmosférica.[5]

### 3.3. Efecto de la geometría de observación

La estrategia empleada para realizar las correcciones atmosféricas hasta acá mencionadas han sido aplicadas a distintos sensores con muy buenos resultados cuando el diseño de los mismo es tal que todas las bandas espectrales miran con un mismo ángulo. Para aplicar el algoritmo de correcciones atmosféricas a un sensor con múltiples ángulos de observación dependientes de la banda, como es el caso de SABIA-Mar hay que considerar esta características como un factor extra [20, 21].

El equipo de Ciencia de la Misión SABIA-Mar ha desarrollado un código de correcciones atmosféricas llamado SMAC (*SABIA-Mar atmospheric correction*) contemplando estas características. Las características geométricas de SABIA-Mar representan un cambio en la perspectiva del algoritmo de corrección atmosférica, originalmente basado en la propuesta del grupo NASA OBPG[5], que hará necesaria una adaptación del algoritmo. Esto impactará en la implementación del algoritmo de corrección atmosférica de SABIA-Mar de la siguiente manera:

- Directamente en el cálculo de la reflectancia de los aerosoles, y en las transmitancias directas y difusas, debido al hecho de que la espesor óptico de aerosoles recuperado después del proceso de corrección atmosférica será ligeramente diferente con respecto al caso de la misma geometría de observación.
- Indirectamente en la reflectancia correspondiente al sunglint y en la reflectancia de espuma marina, debido al acoplamiento de los espesores ópticos de Rayleigh y aerosoles al calcular las transmitancias directas y difusas, respectivamente.

Teniendo en cuenta las expresiones del parámetro épsilon de dispersión (ec. 3.8) y la expresión para la reflectancia de aerosoles  $\rho_a(\lambda)$  propuesta en [9], es posible analizar las diferencias entre el caso de un sensor que tiene su geometría de observación fija para todas las bandas y uno con las características geométricas de SABIA-Mar. La reflectancia de aerosoles de single-scattering se puede escribir como:

$$\rho_a(\lambda_i) = \frac{\omega_a^i \tau_a^i \times p_a^i(\theta_v^i, \phi_v^i; \theta_s, \phi_s)}{4 \cos \theta_v^i \cos \theta_s} \quad (3.10)$$

donde  $\lambda^i$ ,  $\omega_a^i$ ,  $\tau_a^i$ ,  $p_a^i$ ,  $\theta_v^i$ ,  $\phi_v^i$ ,  $\theta_s$  y  $\phi_s$  son la longitud de onda, albedo de dispersión, espesor óptico de aerosoles, función de fase, los ángulos de visión cenitales y azimutales para la banda  $i$  del sensor y los ángulos solares cenitales y azimutales, respectivamente. El espesor óptico de aerosoles  $\tau_a^i$  es una medida de la densidad de aerosoles presentes en la atmósfera, el albedo de dispersión es un indicador de la capacidad de absorción del aerosol que depende de su composición química, forma y tamaño (va entre 0 (partículas muy absorbentes) y 1 (partículas poco absorbentes)) y por ultimo la función de fase es un parámetro de entrada de los modelos de transferencia radiativa, basados en la teoría de Mie (teoría

de dispersión para aerosoles, la cual introdujimos en subsección 2.2.2 pero no desarrollaremos), para determinar la radiación difusa.[5]

Analizando para cada caso tenemos :

- Caso ángulo único (SA),  $\theta_v^1 = \theta_v^2 = \theta_v$  y  $\phi_v^1 = \phi_v^2 = \phi_v$  :

$$\varepsilon(\lambda^1, \lambda^2) = \frac{\rho_a(\lambda_1)}{\rho_a(\lambda_2)} = \frac{\omega_a^1 \tau_a^1}{\omega_a^2 \tau_a^2} \times \frac{p_a^1(\theta_v, \phi_v; \theta_s, \phi_s)}{p_a^2(\theta_v, \phi_v; \theta_s, \phi_s)}, \quad (3.11)$$

De esta manera se cancela el cociente de cosenos y tenemos que :

- El primer factor es independiente de la geometría, pero sí depende del modelo de aerosoles.
  - El segundo factor depende tanto de la geometría como del modelo de aerosoles.
- Caso ángulo múltiple (MA),  $\theta_v^1 \neq \theta_v^2$  y  $\phi_v^1 \neq \phi_v^2$  :

$$\varepsilon(\lambda^1, \lambda^2) = \frac{\rho_a(\lambda_1)}{\rho_a(\lambda_2)} = \frac{\omega_a^1 \tau_a^1}{\omega_a^2 \tau_a^2} \times \frac{p_a^1(\theta_v^1, \phi_v^1; \theta_s, \phi_s)}{p_a^2(\theta_v^2, \phi_v^2; \theta_s, \phi_s)} \times \frac{\cos \theta_v^2}{\cos \theta_v^1}, \quad (3.12)$$

De esta manera, tenemos que:

- El primer factor es independiente de la geometría, pero sí depende del modelo de aerosoles.
- El segundo factor depende tanto de la geometría como del modelo de aerosoles.
- El tercer factor depende de la geometría pero es independiente del modelo de aerosoles.

Por lo tanto el equipo de ciencia de SABIA-Mar tuvo que adaptar el algoritmo estándar en su totalidad, incluyendo esta característica geométrica. Podemos ver en el siguiente diagrama de flujo (figura 3.2) los pasos a seguir del proceso de corrección atmosférica (simplificado, solo exhibiendo lo necesario para el nivel de profundidad planteado en este trabajo). En rojo observamos el término en el cual se deberán realizar adaptaciones del algoritmo de corrección atmosférica debido a la configuración geométrica particular (MA) de SABIA-Mar.

### 3.4. Algoritmo SMAC

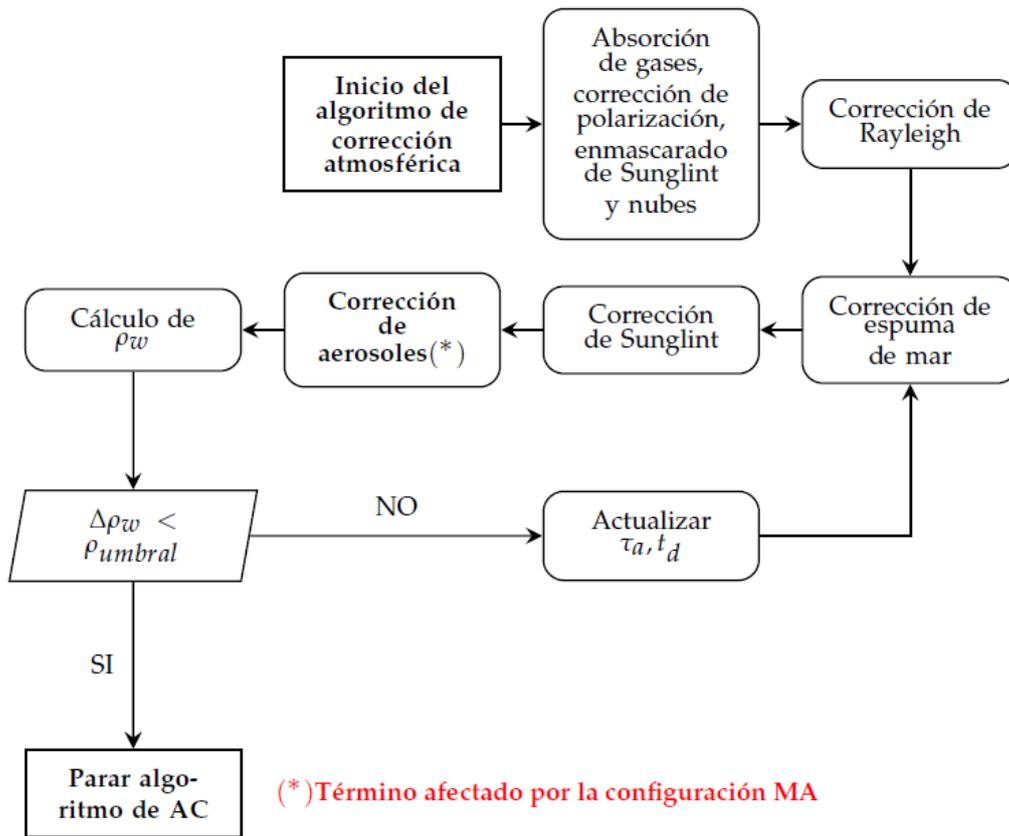


Figura 3.2: Diagrama de flujo de la corrección atmosférica SMAC.

El algoritmo SMAC es un proceso iterativo que supone como parámetro de *guess* un valor fijo de espesor óptico de aerosoles, que se modifica en cada paso hasta converger. El diagrama de flujo del algoritmo SMAC consta de los siguientes pasos:

1. Se inicia el algoritmo con los datos de entrada: reflectancia a TOA  $\rho_{toa}(\lambda_i)$ , la geometría de observación  $(\theta_v, \theta_s, \Delta\phi)$  y como datos auxiliares la humedad relativa  $(rh)$ , velocidad del viento  $(W_s)$  y presión atmosférica  $(P)$ . Se toma  $\tau_a(\lambda_i) = 0,1$  como parámetro de *guess* inicial para cada banda  $i$  de SABIA-Mar.
2. Se aplica la corrección por absorción gaseosa y por polarización a  $\rho_{toa}$  (no tratados en este trabajo). Además, en esta etapa se enmascaran los píxeles con alto *sunlint* y los píxeles con nubes.
3. Una vez realizado el paso 2) se corrige el efecto molecular de Rayleigh, donde se usan las LUTs mencionadas en la sección 3.2 para interpolar la reflectancia de Rayleigh con la geometría del píxel.
4. A la resultante del paso 3) se le aplica la corrección por espuma de mar (*whitecaps*) mencionada en la sección 3.2.
5. Al resultado del paso 4) se lo corrige por *sunlint* de acuerdo al modelo de la sección 3.2.
6. Previamente a la primera estimación de  $\rho_w$ , se elimina el efecto de los aerosoles mediante el modelo de dispersión única [9] descrito en la sección 3.2. Este paso genera, además, el valor de  $\tau_a(\lambda_i)$ .
7. Se obtiene como producto final la reflectancia que emerge del agua,  $\rho_w$ , normalizando por la transmitancia difusa,  $t_d$ .

8. Se repiten los pasos 4, 5 y 6 hasta que el valor de  $\rho_w$  no cambia en cada iteración. Estos pasos se repiten varias veces, porque en cada iteración hay una modificación en  $t_d$ . Sin embargo, se establece un número máximo de iteraciones para garantizar que el algoritmo converja correctamente. En este caso se establece un  $\rho_{umbral} = 10^{-8}$ , es decir  $\Delta\rho_w = \rho_w^{i+1} - \rho_w^i < 10^{-8}$ , entre la iteración  $i$  y  $i + 1$ , con un máximo de iteraciones  $i = 10$ .



## Capítulo 4

# Metodología de trabajo

En este capítulo comenzamos repasando brevemente los objetivos principales planteados al comienzo del trabajo. Se explica la estrategia y los pasos a seguir para lograr los mismos en la sección 4.1, luego en la sección 4.2 introducimos el código a utilizar para emular datos *reales* ya que el satélite SABIA-Mar esta en desarrollo y no se dispone de las mediciones y datos reales, en la sección 4.3 se explica la geometría de las simulaciones realizadas, seguimos presentando en la sección 4.4 las condiciones atmosféricas y superficiales con las cuales se realizan las simulaciones y por ultimo se presentan las métricas y estrategia de evaluación en la sección 4.5.

### 4.1. Esquema de trabajo

Nuestro objetivo principal es poder evaluar qué tanto difiere el desempeño del algoritmo de corrección atmosférica (CA) si se realiza de la manera estándar (en donde la geometría de observación es similar para todas las bandas espectrales) en comparación con una configuración en donde los ángulos de observación varían, como es el caso de SABIA-Mar. Por lo tanto, para poder realizar esta comparación primero debemos evaluar el rendimiento del algoritmo SMAC en ambos casos, es decir en la configuración de ángulo único (SA) (caso de referencia) y en la de ángulos múltiples (MA). Luego, debemos establecer métricas o estadísticos que nos permitan comparar los resultados obtenidos.

Ya que el resultado final del algoritmo de correcciones atmosféricas es la reflectancia proveniente del cuerpo de agua,  $\rho_w$ , calcularemos el error de dicha estimación,  $\Delta\rho_w$ , como:

$$\Delta\rho_w = \rho_w^{\text{SMAC}} - \rho_w^{\text{REAL}}$$

donde  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  es la reflectancia que emerge del agua estimada por el algoritmo SMAC (con los modelos explicado en el capítulo 3) y  $\rho_w^{\text{REAL}}$  es la *verdad de campo*.

Calcularemos  $\Delta\rho_w$  tanto para el caso SA como MA y esta cantidad será la que nos permitirá analizar como cambia el rendimiento del algoritmo de corrección atmosférica para la geometría de observación variable que posee SABIA-Mar.

Es importante observar que, como el satélite SABIA-Mar todavía está en desarrollo, no se disponen de las mediciones y datos reales. Por lo tanto, se debe buscar una alternativa para generar datos que emulen de la manera más realista posible las mediciones de los sensores. Para esto utilizaremos un código de transferencia radiativa que, dadas las condiciones atmosféricas y de composición del agua, calcula el valor de la radiancia a TOA. En este trabajo, utilizaremos el software de código abierto OSOAA (Ocean Successive Orders with Atmosphere - Advanced) [22], que ha sido validado dentro de la comunidad de *color del mar*. OSOAA simula valores de reflectancia a distintas alturas según los parámetros ambientales ingresados como datos de entrada. En la sección 4.2 daremos mas detalles de su funcionamiento.

En la figura 4.1 se encuentra resumido todo el proceso que aplicaremos. Este consiste de los siguiente pasos:

1. Se definen los parámetros geométricos, atmosféricos y oceánicos que mejor representan la situación que queremos emular. En este trabajo nos restringiremos a condiciones típicas de mar abierto, conocidas como *aguas caso 1* que son aquellas en donde todas las propiedades ópticas inherentes del cuerpo de aguas pueden ser parametrizadas por la concentración de chl-a [23].



y de aerosoles y las concentraciones de clorofila y partículas similares a minerales en el cuerpo de agua. También permite simular la interfaz de la superficie del mar que puede ser modelada ya sea para una superficie plana o teniendo en cuenta la rugosidad del mar definida por la velocidad del viento, la cual será dato de entrada. Por último, el modelo OSOAA ofrece una amplia variedad de modelos de aerosoles, es decir distribuciones de tamaño de aerosoles para hacer que las propiedades ópticas de la atmósfera sean altamente cercanas a condiciones del mundo real. En nuestro caso utilizaremos modelos precalculados de Shettle and Fenn [25].

### 4.3. Escenario de observación de SABIA-Mar

Uno de los objetivos de este trabajo es evaluar el algoritmo de corrección atmosférica que estará operativo para la misión SABIA-Mar. Con toda la información conocida sobre la misión, incluyendo la geometría de observación del satélite que queda definida a partir de conocer su órbita y la forma de adquisición de las cámaras, se pudo simular la *pasada* del satélite incluyendo la pisada en Tierra, la posición del sol para una fecha del año establecida y los ángulos de visión de cada una de las bandas localizadas en la cámara VIS-NIR.

La figura 4.2 muestra la simulación de 5 líneas realizada por el Equipo de Ciencia de SABIA-Mar de una pasada del satélite para el día 20 de marzo de 2025 y otra pasada para el día 20 de diciembre de 2025 donde solo se simula una línea. Cada línea del mapa representa los 1500 píxeles con 800 m de resolución que adquirirá SABIA-Mar en su ancho de barrido (*swath* en inglés) de 1500 Km. Si bien el satélite adquirirá tal información línea tras línea sin huecos, por una cuestión de capacidad de cómputo solo se han seleccionado un conjunto discreto de líneas. Por el mismo motivo se ha seleccionado un subconjunto de los 1500 píxeles eligiendo uno cada 60 píxeles, es decir, se analiza un total de 24 píxeles por línea. Estos puntos se enumeran en orden creciente de oeste a este en cada una de las líneas observadas.

En la figura 4.3 se ilustran los ángulos cenitales ( $\theta$ ) y azimutales ( $\phi$ ) de la dirección del sol y de observación, también se puede observar la relación entre los ángulos azimutales. En la figura 4.4 se esquematiza la geometría de observación de las distintas bandas, para el píxel central de una línea, para la configuración MA de SABIA-Mar.

#### 4.3.1. Geometría de observación con ángulo único (SA)

En la figura 4.5 se muestran los ángulos cenitales y azimutales (izquierda y derecha, respectivamente) en función de los píxeles de la Línea 0 para las distintas bandas. Como podemos ver en esta configuración los valores de los ángulos, tanto ( $\theta_v$ ) y ( $\phi_v$ ), no dependen de las bandas. Recordemos que esta configuración representa un caso hipotético que, si bien no es la configuración real de SABIA-Mar, nos servirá como referencia para hacer todas las comparaciones.

El ángulo cenital  $\theta_v$  tiene un valor mínimo en el centro y toma valores mayores hacia los extremos del barrido (píxeles de los extremos), toma valores dentro del intervalo  $[1.03^\circ, 52.39^\circ]$ . El ángulo azimutal  $\phi_v$  presenta una caída abrupta al pasar por el centro debido a que cambia de signo, toma valores comprendidos en el intervalo  $[-77.11^\circ, 101.13^\circ]$ ,

#### 4.3.2. Geometría de observación con ángulo variable (MA)

En la figura 4.6 se observa los ángulos cenitales y azimutales (izquierda y derecha, respectivamente) en función de los píxeles de la Línea 0 para las distintas bandas. Estos ángulos representan la situación real de la geometría del satélite.

El ángulo cenital  $\theta_v$  tiene un valor mínimo en el centro y toma valores mayores hacia los extremos del barrido (píxeles de los extremos). Los valores están dentro del intervalo  $[2.22^\circ, 53.11^\circ]$  y varían según el ángulo de observación de cada banda. El ángulo azimutal  $\phi_v$  presenta una caída abrupta al pasar por el centro para las bandas que *miran* hacia atrás (respecto a la trayectoria del satélite) y mas leve para las que *miran* hacia adelante, notándose así que depende de la banda. Toma valores comprendidos en el intervalo  $[-163.2^\circ, 169.62^\circ]$ .

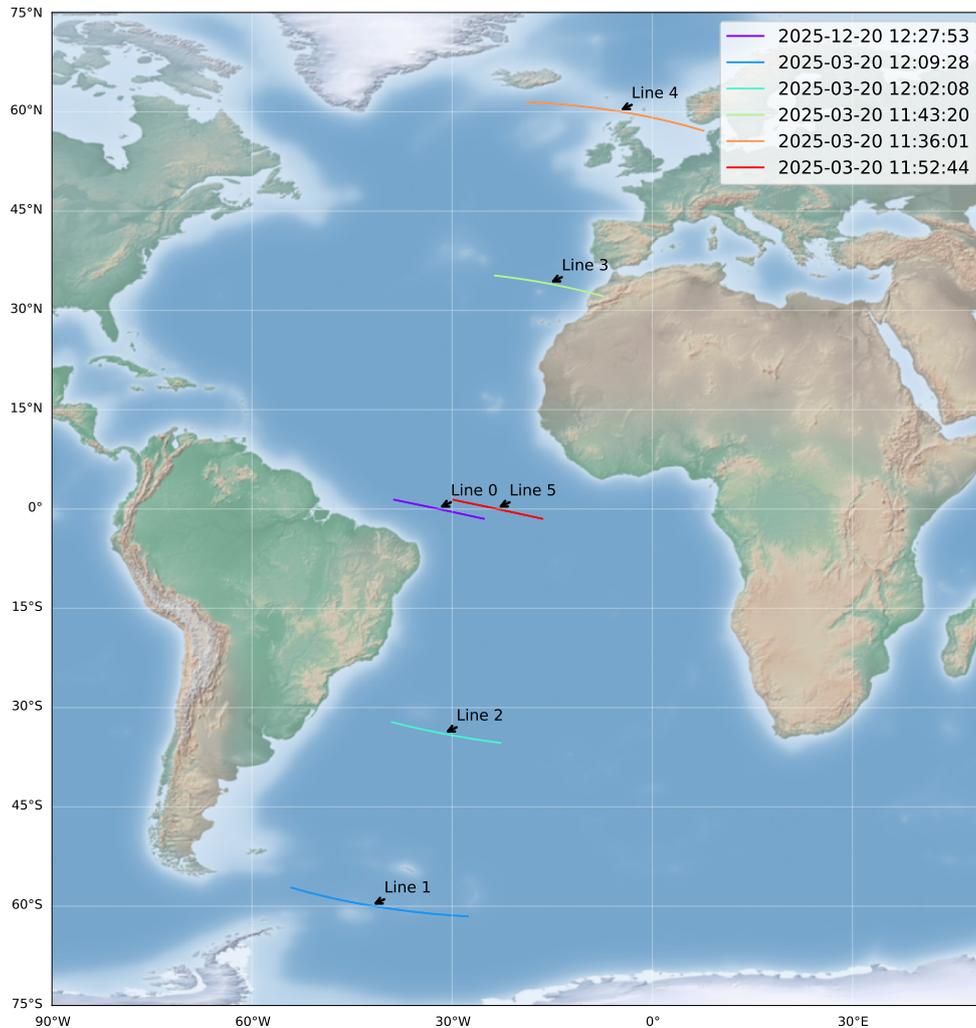


Figura 4.2: Locación y fechas de las líneas transversales a la trayectoria del satélite SABIA-Mar. Se observan las 6 líneas distribuidas a lo largo de la trayectoria, siendo todas datadas en marzo de 2025 excepto la Línea 0 que corresponde a diciembre de 2025. Extraída de [12]

## 4.4. Condiciones atmosféricas y superficiales

Las simulaciones se realizarán variando parámetros atmosféricos y de la superficie del agua: implementando distintos modelos de aerosoles, variando espesor óptico de aerosoles, humedad relativa (RH), presión atmosférica, concentración de clorofila-a (Chl-a) y la velocidad del viento ( $W_s$ ).

### 4.4.1. Modelos de aerosoles

En el capítulo 3 vimos que en el algoritmo de correcciones atmosféricas SMAC el efecto de la variación en la geometría de observación para las distintas bandas espectrales se pone de manifiesto, principalmente, en el término de la reflectancia causada por aerosoles. Es decir, que a priori, el modelado de los aerosoles será de suma importancia al momento de comparar SMAC entre los casos SA y MA ya que este será sensible a cambios en el modelado de los mismos.

En este trabajo nos enfocaremos en los 4 modelos de aerosoles, marítimo, costero, troposférico y urbano, basados en la propuesta de Shettle y Fenn en el año 1979 [25]. Estos modelos se han venido usando ampliamente en la comunidad de *color del mar*, y están derivados del *Modelo Rural* que representa los aerosoles en condiciones en las que la atmósfera no está directamente influenciado por fuentes de aerosoles urbanos e industriales. Se asume que los aerosoles rurales están compuestos por una mezcla del 70 % de sustancias solubles en agua (amonio y sulfato de calcio, así como también compuestos orgánicos) y el 30 % de aerosoles tipo polvo.

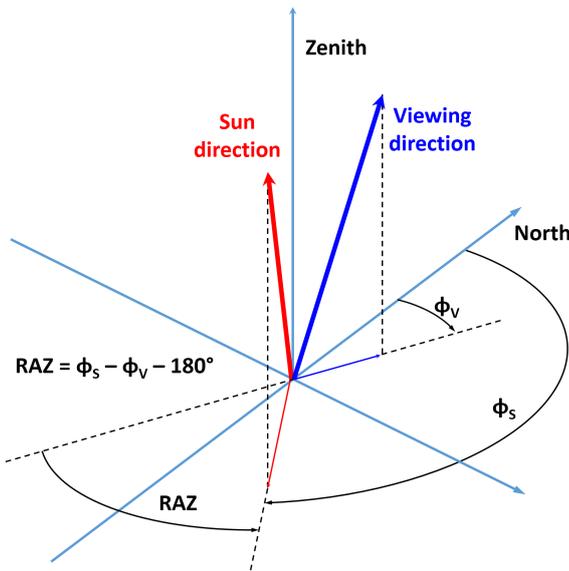


Figura 4.3: Esquema de la geometría del sistema. Se observan los ángulos cenitales y azimutales de la dirección del sol y de observación, como así también un eje cartesiano de las coordenadas geográficas.

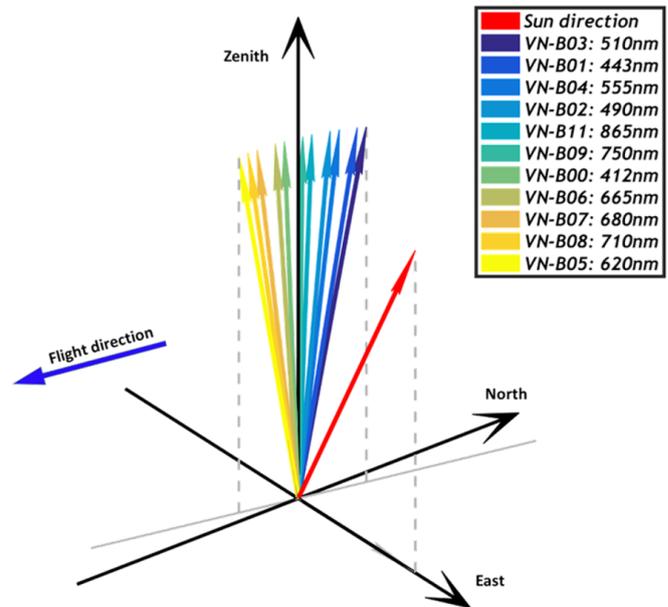


Figura 4.4: Representación de la geometría de observación variable del satélite SABIA-Mar para el píxel central de una línea con referencia geográfica y de dirección de vuelo. Se cataloga cada banda espectral.

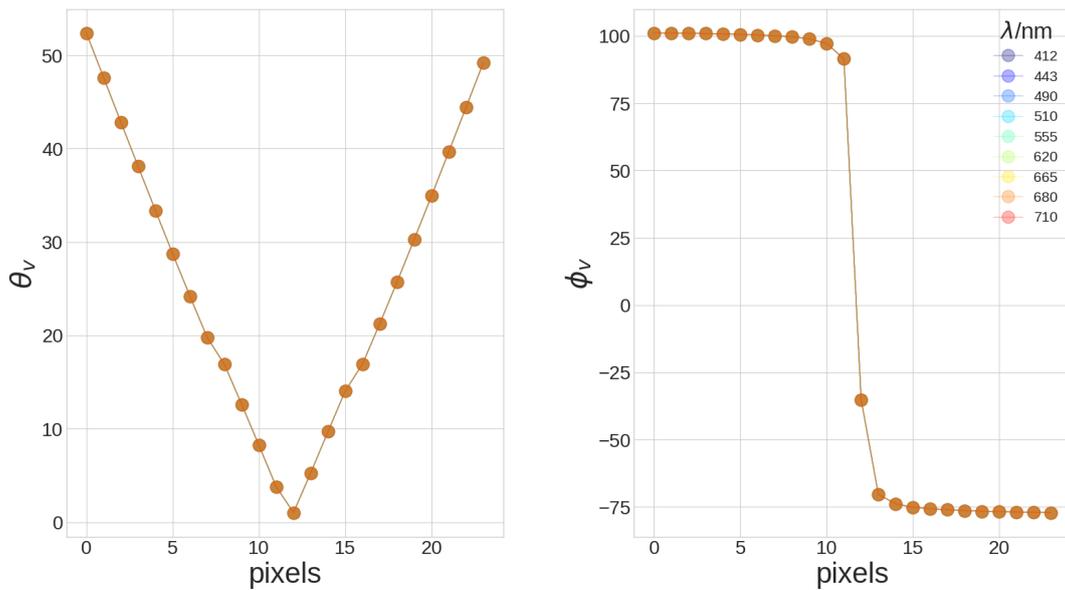


Figura 4.5: Geometría de observación para la configuración SA de la Línea 0:  $\theta_v$  y  $\phi_v$  vs píxeles. Donde  $\theta_v \in [1.03^\circ, 52.39^\circ]$  y  $\phi_v \in [-77.11^\circ, 101.13^\circ]$ . Todos las bandas poseen la misma geometría de observación.

### Modelo Marítimo

Las composiciones y distribuciones de aerosoles de origen oceánico son significativamente diferentes de los tipos de aerosoles continentales (urbano, rural). Los aerosoles consisten principalmente de partículas de sal marina que se producen por la evaporación de gotas de espuma marina y la agregación de agua en condiciones de alta humedad relativa. Se forma con dos componentes: sal marina y un componente continental que se asume como idéntico al aerosol rural, con la excepción de que las partículas muy grandes son despreciadas, ya que eventualmente se perderán debido a la caída causada por su peso cuando se desplazan sobre los océanos. Este modelo forma una capa uniforme entre 2-3 km en la atmósfera sobre el océano.

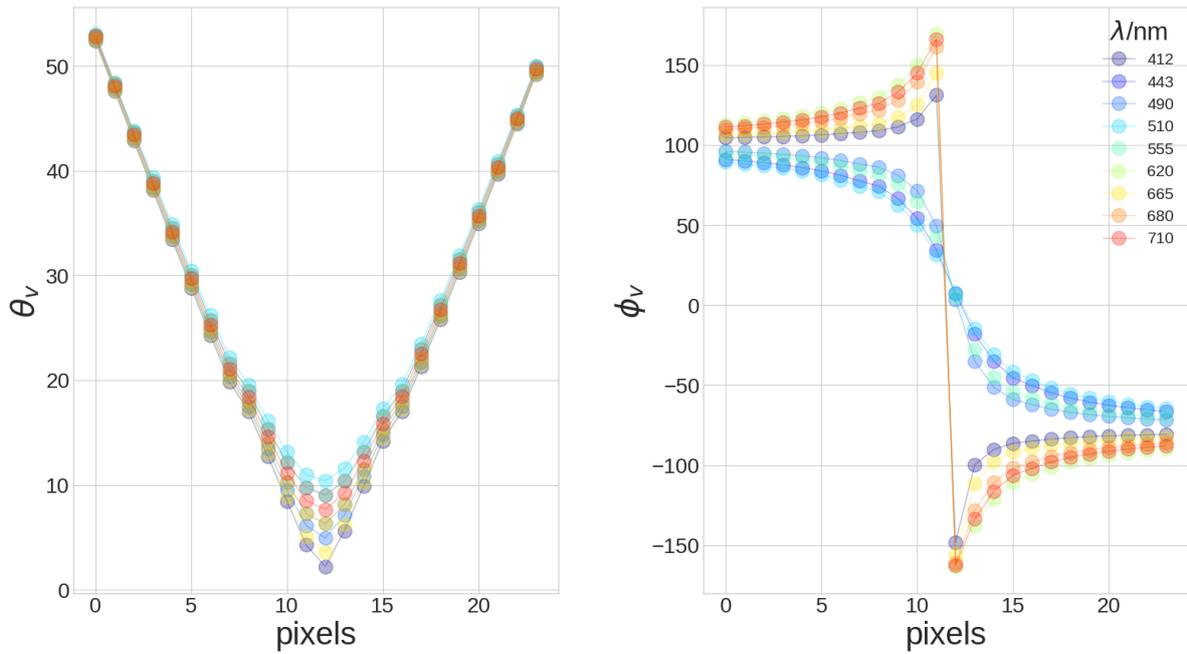


Figura 4.6: Geometría de observación para la configuración MA de la Línea 0:  $\theta_v$  y  $\phi_v$  vs píxeles. Donde  $\theta_v \in [2.22^\circ, 53.11^\circ]$  y  $\phi_v \in [-163.2^\circ, 169.62^\circ]$

### Modelo Costero

El Modelo Costero es introducido por Gordon en 1994 [9]. Este tiene la misma distribución de aerosoles que el modelo marítimo con la excepción que contiene la mitad de la fracción de aerosoles de sal marina presentes en este último.

### Modelo Troposférico

El Modelo de aerosol Troposférico representa los aerosoles dentro de la troposfera por encima de la capa inicial de la misma. Se asume que estos aerosoles tienen la misma composición que el Modelo Rural. La distribución del tamaño de las partículas se modifica respecto al Modelo Rural al eliminar la componente de partículas grandes o gruesas (con un diámetro aerodinámico mayor a 0.5 micrómetros) de la distribución de tamaños debido a que, por encima de la capa inicial, estas partículas grandes presentan mayor tendencia a caer debido a su peso.

### Modelo Urbano

En áreas urbanas la atmósfera con aerosoles rurales se modifica principalmente por la adición de aerosoles provenientes de combustiones y fuentes industriales. Este modelo es entonces una mezcla de aerosoles rurales con aerosoles carbonosos. Se asume que estos aerosoles tipo hollín tienen la misma distribución de tamaño que los componentes del Modelo Rural. Las proporciones de la mezcla de aerosoles se asume un 20% de tipo hollín y un 80% de tipo rural.

## 4.5. Métricas y estrategia de evaluación

Primero, evaluamos el desempeño del algoritmo SMAC, tanto en el caso SA como en el MA, en relación a la verdad de campo (OSOAA) utilizando los siguientes estimadores [12]:

- Error total:  $\Delta\rho = \rho_w^{SMAC} - \rho_w^{OSOAA}$
- Error relativo porcentual:  $\Delta\rho(\%) = (\rho_w^{SMAC} - \rho_w^{OSOAA}) / \rho_w^{OSOAA} \times 100$

Para ambos casos las métricas de error a utilizar para evaluar estos estimadores son:

- Bias : es el valor medio del estimador en cuestión  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\rho_i$

- Mediana: es el valor de la variable que se encuentra en la mitad de la distribución de la misma.
- Desviación estándar ( $\sigma$ ): es la desviación estándar de la variable.  $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\rho_i - bias)^2}$
- Rango intercuartil (IQR): es el rango en el cual se encuentra el 50 % central de la distribución. Esto es entre el percentil 75 y el 25 de la distribución.
- Error cuadrático medio (MSE) : es el promedio del estimador al cuadrado. Es el error cuadrático medio usual, solo que hay que tener en cuenta que nuestro estimador ya es la diferencia del valor calculado y el *real*.  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\rho_i)^2$
- Diferencia entre casos SA y MA.

Estos estimadores nos permiten hacer comparaciones entre los casos MA y SA en diferentes escenarios de simulación.



# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para todas las simulaciones de las geometrías de observación MA (*multi-angle*) y SA (*single-angle*). Dividimos el análisis de acuerdo a los diferentes modelos de aerosoles, y a su vez, de acuerdo a las diferentes configuraciones angulares. Usamos como base el trabajo realizado por el Equipo de Ciencia de SABIA-Mar[12], extendiendo el análisis de los modelos marítimo y costero al troposférico y urbano.

Comenzamos especificando las condiciones de simulación en la sección 5.1, luego en sección 5.2 se trata el modelo marítimo para brindar con mejor detalle los procedimientos involucrados y resultados obtenidos en el trabajo. En la sección 5.3 se exhiben y analizan los resultados obtenidos para los demás modelos y el caso global, el cual consiste en el estudio de las simulaciones de todos los modelos juntos.

### 5.1. Condiciones de simulación

En esta sección especificaremos los parámetros y condiciones con las cuales se generaron todas las simulaciones.

Las condiciones geométricas incluyen los ángulos de visión del satélite y del sol correspondientes a las líneas de la pasada de SABIA-Mar, tal como se describió en la sección 4.3. Los rangos de variación de los ángulos son los siguientes:

- Ángulos de visión del satélite:
  - $\theta_v \in [0.88^\circ, 52.6^\circ]$
  - $\phi_v \in [-81.62^\circ, 117.94^\circ]$
- Ángulos solares:
  - $\theta_s \in [20.83^\circ, 71.27^\circ]$
  - $\phi_s \in [31.75^\circ, 178.48^\circ]$

Los ángulos jugarán un papel importante dado que para ciertos píxeles notaremos la presencia de un gran componente de *sunlint*, haciendo necesario el enmascarado de los mismos.

Se seleccionaron los cuatro modelos de aerosoles basados en Shettle y Fenn [25]:

- Marítimo.
- Costero.
- Troposférico.
- Urbano.

Se utilizan las siguientes condiciones ambientales (superficie del mar y atmósfera):

- Concentración de Cl-a (chl-a): 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 1.0, 3.0 [mg/m<sup>3</sup>]
- Humedad relativa (RH): 75 %, 90 %

- Espesor óptico de aerosoles ( $\tau_a$ ): 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3
- Viento en superficie ( $W_s$ ): 5., 7.5, 10. [m/s]
- Presión atmosférica: 1013.25 hPa.

La clorofila-a influirá de manera activa ya que a mayor cantidad, mayor es la absorción de la irradiancia en la región del azul, variando así  $\rho_w$ . De igual manera, los distintos valores de espesor óptico harán variar la componente  $\rho_{aer}$  dado que esta es función de  $\tau_a$ . La velocidad del viento en superficie es determinante en el modelado de la espuma marina siendo  $\rho_{wc}$  proporcional a este, además de amplificar las regiones afectadas con *sunglint*.

Todas estas condiciones resultan en un total de 1008 simulaciones por píxel, 24192 por línea y un total de 145152 simulaciones.

## 5.2. Resultados para el Modelo Marítimo

Comenzaremos estudiando el caso con configuración de ángulo único SA aplicando los algoritmos estándares para luego poder comparar con el caso de una configuración en donde los ángulos de observación varían para las distintas bandas espectrales, caso de ángulo múltiple MA.

### 5.2.1. Caso de ángulo único (SA)

#### Verdad de campo: simulaciones OSOAA

Las simulaciones realizadas de la reflectancia a TOA,  $\rho_{toa}^{OSOAA}$ , y que emerge del agua,  $\rho_w^{OSOAA}$ , para un caso particular con parámetros Chl-a = 0.01 mg/m<sup>3</sup>, RH = 75 %,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5$  m/s se observan en la figura 5.1.

Entre el píxel 12 y 23 se puede observar un aumento en el valor de  $\rho_{toa}$  debido a que en el horario y locación en las que se realizaron las simulaciones el satélite recibe reflejo directo del sol (*sunglint*) desde esos píxeles. Estos posteriormente serán *enmascarados* para no ser procesados por el código SMAC, ya que su funcionamiento está restringido a píxeles libres de *sunglint*.

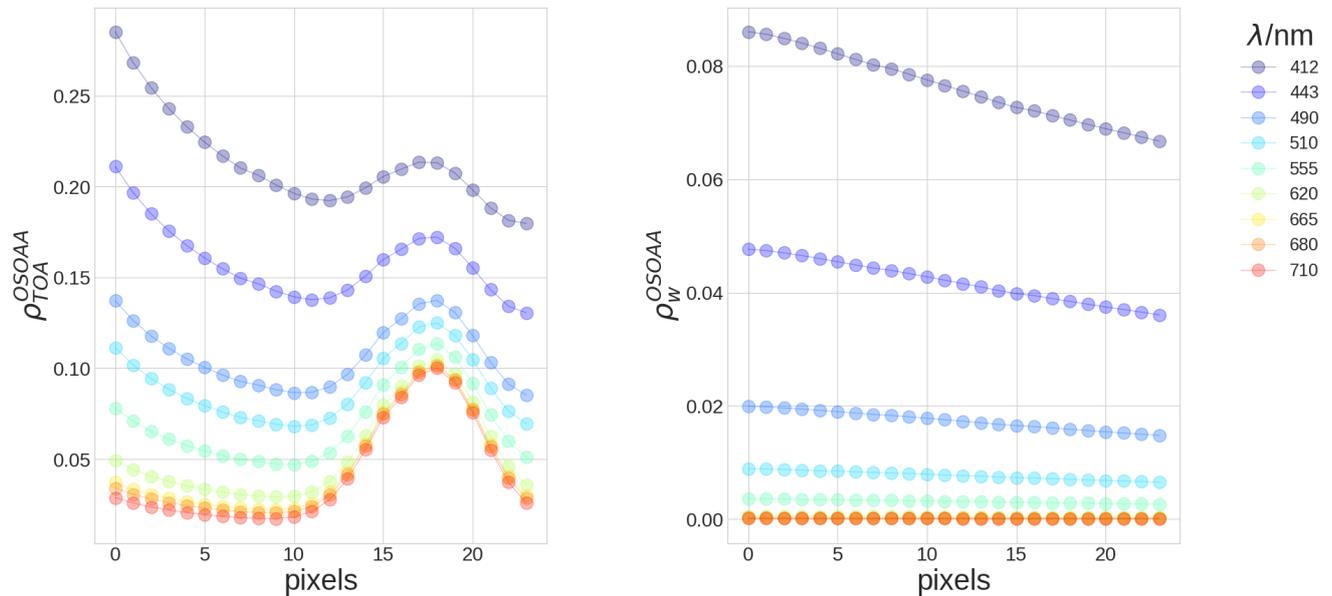


Figura 5.1: Resultados de simulaciones OSOAA para píxeles de la Línea 0 en configuración SA, considerando el modelo marítimo, Chl-a = 0.01 mg/m<sup>3</sup>, RH = 75 %,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5$  m/s. El gráfico de la izquierda muestra  $\rho_{TOA}^{OSOAA}$ , mientras que el de la derecha  $\rho_w^{OSOAA}$  para diferentes valores de  $\lambda = 412, 443, 490, 510, 555, 620, 665, 680$  y 710 nm.

Se pueden observar ciertos comportamientos típicos, como por ejemplo, una reflectancia menor en la superficie del agua (gráfico de la derecha) para longitudes onda cercanas al rojo (compatible con la

aproximación de píxel negro) en contraste con las demás bandas. También se observan valores mayores de la reflectancia en TOA en comparación con la de superficie debido a la gran contribución atmosférica, especialmente del efecto molecular (Rayleigh). En consecuencia, se comprueba que la mayor parte de la radiación que llega a la altura del satélite es debida a la atmósfera y una parte muy pequeña corresponde a la que emerge del agua, siendo este el principal desafío para cualquier estrategia de corrección atmosférica.

### Correcciones atmosféricas SMAC

Sobre  $\rho_{toa}^{OSOAA}$  se aplican los algoritmos de corrección atmosférica para volver a obtener el valor de  $\rho_w$  (camino inverso explicado en la sección 4.1). En este proceso se pueden obtener por separado todos los sumandos presentes en la ecuación de transferencia radiativa (Ecuación (3.2)). Podemos observar todos los términos en la figura 5.2.

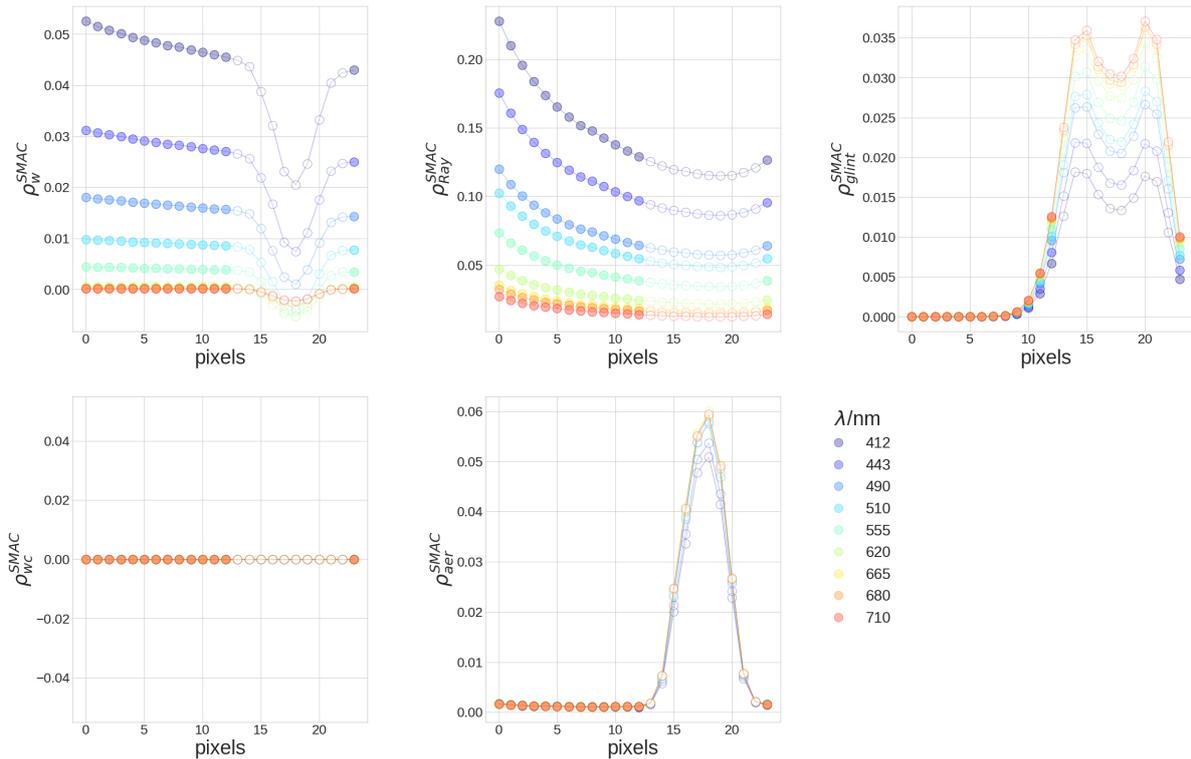


Figura 5.2: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración SA en función de los píxeles de la Línea 0 para las longitudes de onda  $\lambda= 412, 443, 490, 510, 555, 620, 665, 680$  y  $710$  nm. En todos los casos se usó el modelo marítimo,  $Chl-a = 0.01 \text{ mg/m}^3$ ,  $RH = 75\%$ ,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5 \text{ m/s}$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sun glint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

Si observamos la figura 5.2 veremos en el gráfico superior izquierdo la reflectancia que emerge del agua obtenida luego aplicar el SMAC  $\rho_w^{SMAC}$ , la cual debería coincidir con la *verdad de campo*  $\rho_w^{OSOAA}$  si la corrección fuera perfecta. En el gráfico superior del centro se observa la reflectancia causada por dispersiones de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  (dispersión con moléculas) y a la derecha, la reflectancia debida al *sun glint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ , para la cual notamos valores que van desde 0.01 hasta 0.035 entre el píxel 12 y el 23. En la parte inferior a la izquierda, se observa la reflectancia causada por la espuma de mar  $\rho_{wc}^{SMAC}$ , que en este caso donde el parámetro viento es  $5 \text{ m/s}$  es prácticamente nula y a la derecha se gráfica la reflectancia causada por los aerosoles presentes en la atmósfera  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

En todas las imágenes los pares ordenados blancos corresponden a aquellos píxeles enmascarados por alto valor de reflexión solar especular y no se tendrán en cuenta para ningún análisis.

Otra manera de observar la variación de las componentes obtenidas mediante la corrección atmosférica para distintos parámetros ambientales, es graficando en función de la longitud de onda para ciertos píxeles, como se ve en las figuras 5.3, 5.4 y 5.5. Se exhiben, para contrastar, los parámetros concentración de

Chl-a: 0.01, 1 [ $mg/m^3$ ] y viento: 5 y 10 [ $m/s$ ] con espesor óptico de aerosol: 0.1 y humedad relativa: 75 %.

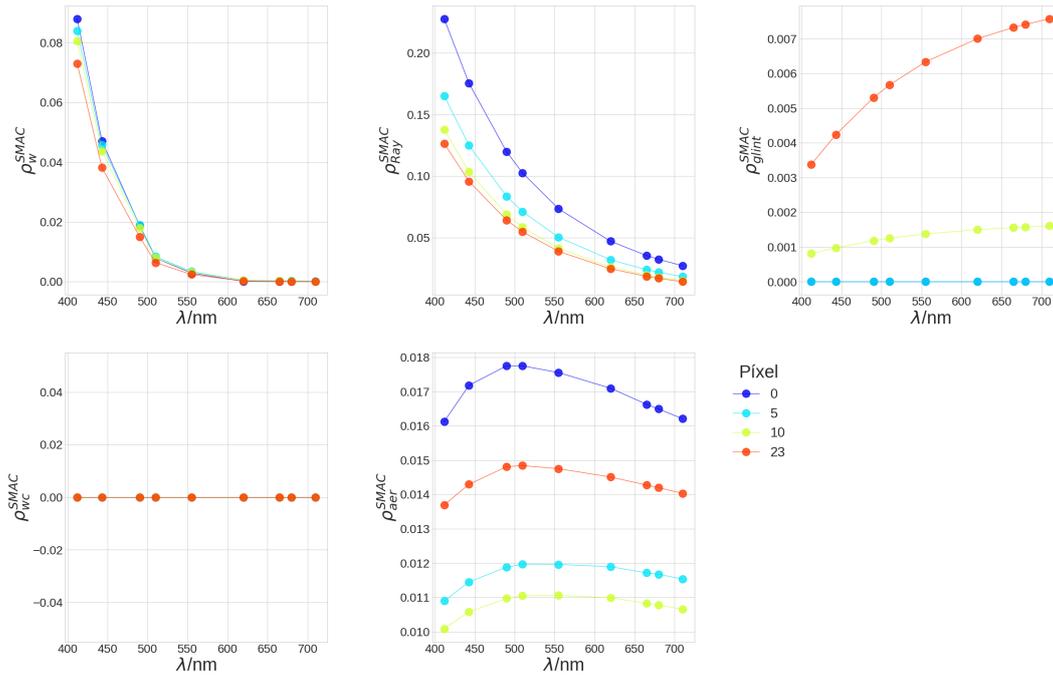


Figura 5.3: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración SA en función de la longitud de onda para cuatro píxeles de la línea 0. En todos los casos se usó el modelo marítimo, Chl-a = 0.01  $mg/m^3$ ,  $W_s = 5 m/s$ ,  $RH = 75\%$  y  $\tau_{aer} = 0.1$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sunglint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

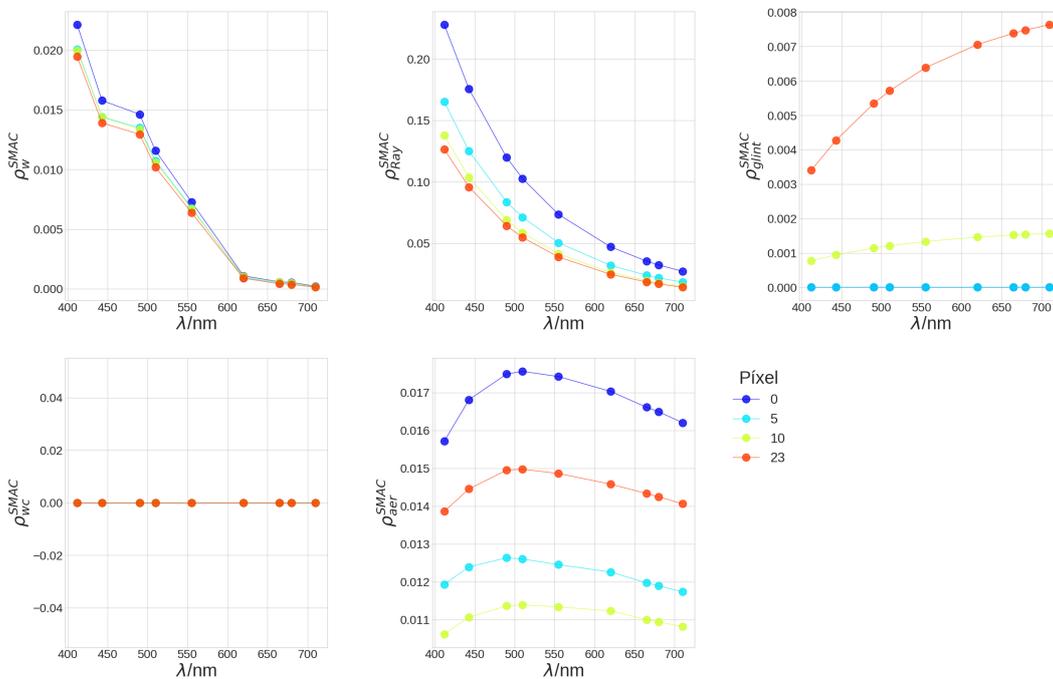


Figura 5.4: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración SA en función de la longitud de onda para cuatro píxeles de la línea 0. En todos los casos se usó el modelo marítimo, Chl-a = 1  $mg/m^3$ ,  $W_s = 5 m/s$ ,  $RH = 75\%$  y  $\tau_{aer} = 0.1$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sunglint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

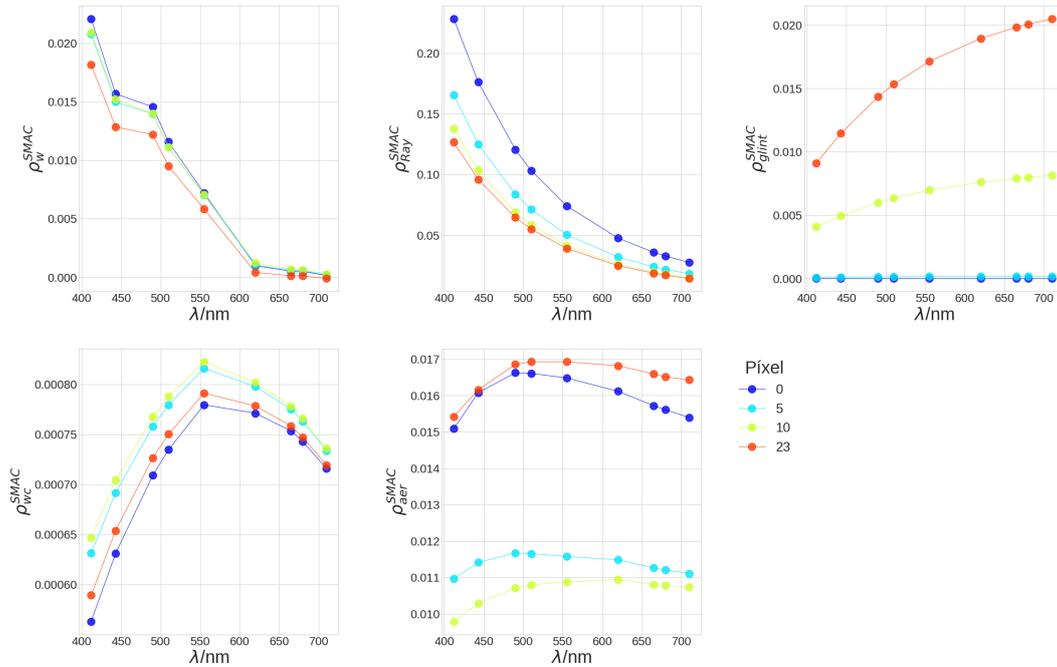


Figura 5.5: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración SA en función de la longitud de onda para cuatro píxeles de la línea 0. En todos los casos se usó el modelo marítimo,  $Chl-a = 1 \text{ mg/m}^3$ ,  $W_s = 10 \text{ m/s}$ ,  $RH = 75 \%$  y  $\tau_{aer} = 0.1$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sun glint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

En las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se grafican las mismas magnitudes descritas para la figura 5.2 y con la misma disposición en la figura. Si comparamos entre las figuras 5.3 y 5.4 podemos notar, en la última, un corte en el decrecimiento de la  $\rho_w^{SMAC}$  en la banda de 490 nm correspondiente al verde. Esto ocurre en la curva correspondiente al valor de clorofila-a más alta, la cual absorbe gran parte de la irradiancia que llega al agua, disminuyendo así  $\rho_w^{SMAC}$  para todas las longitudes de onda excepto la de 490 nm que es la que sigue irradiando de igual manera debido al característico color verde de la clorofila-a. Se puede notar en las 3 figuras el aumento de  $\rho_{glint}^{SMAC}$  cuando se observan los píxeles cercanos al extremo este del swath de la Línea 0, siendo estos el píxel 23 y 10. Finalmente, comparando entre las figuras 5.4 y 5.5 podemos observar como en la primera  $\rho_{wc}^{SMAC}$  es nulo mientras que en la segunda  $\rho_{wc}^{SMAC}$  toma valores no triviales, denotando la relación intrínseca de  $\rho_{wc}^{SMAC}$  con la velocidad del viento.

### Comparación $\rho_w$ entre OSSOA y SMAC

La cantidad  $\rho_w$  es la variable a estudiar, si la corrección atmosférica fuera perfecta no habría diferencia entre la calculada mediante SMAC y la reflectancia *real* de OSSOA. Por lo que se busca minimizar las diferencias estadísticas entre ambos modelos. Para evaluar cuánto difieren entre sí se calcula el valor del error total,  $\Delta\rho_w$ , y error relativo,  $\Delta\rho_w(\%)$ , definido en la sección 4.5. En la figura 5.6 se muestran los resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración SA y las simulaciones OSSOA en función de los píxeles de la Línea 0.

A partir de lo observado en la figura 5.6 podemos notar que el algoritmo SMAC sobre estima sistemáticamente  $\rho_w$ . También se puede observar los valores bajos de  $\rho_w$  para los píxeles de las bandas cercanas al infrarrojo en comparación a las demás bandas, aquellos considerados píxeles negros como mencionamos anteriormente, dando lugar a gran error porcentual que veremos mas claramente en las siguientes figuras.

Se estudiará el error cometido, teniendo en cuenta la evaluación de todas las combinaciones de condiciones posibles, incluyendo todas las líneas simuladas, siendo un total de 36288 simulaciones a las cuales se les restaran los píxeles marcados con banderas (píxeles afectados por el *sun glint*). En la figura 5.7 se observa el error total  $\Delta\rho_w$  (derecha) del algoritmo SMAC para las bandas desde 412 nm hasta 710 nm

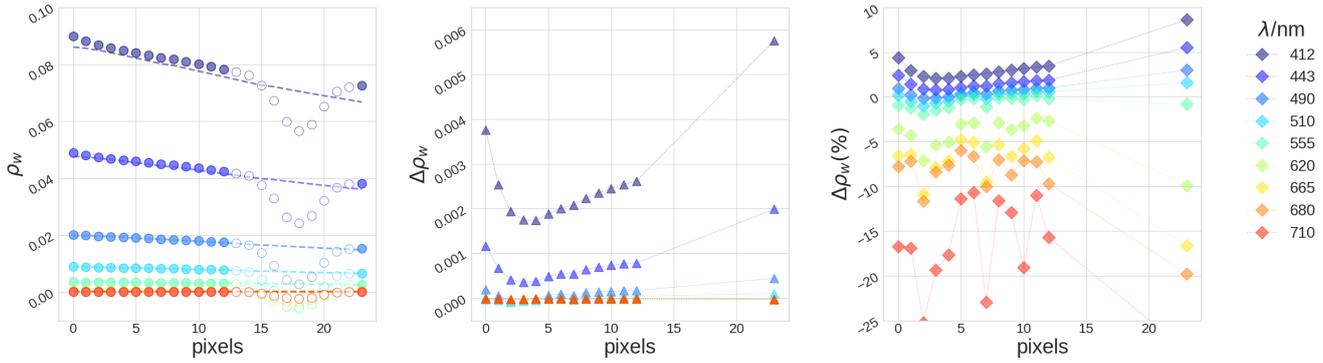


Figura 5.6: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración SA y las simulaciones OSOAA en función de los píxeles de la Línea 0, considerando el modelo marítimo,  $\text{Chl-a} = 0.01 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{RH} = 75\%$ ,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5 \text{ m/s}$ . El primer gráfico, de izquierda a derecha, muestra  $\rho_w^{\text{OSOAA}}$  con líneas discontinuas y  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  con círculos, en  $\lambda = 412, 443, 490, 510, 555, 620, 665, 680$  y  $710 \text{ nm}$ . Los círculos vacíos corresponden a píxeles marcados con reflejo alto que se descartan para el análisis de errores en el post procesamiento. Los resultados correspondientes para  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w(\%)$  se muestran en el segundo y tercer gráfico, respectivamente.

y su histograma (izquierda). En la figura 5.8 se presenta el valor del error relativo  $\Delta\rho_w(\%)$  (derecha) y su histograma (izquierda). En el gráfico de la derecha se observan también las correspondientes métricas de los estimadores las cuales fueron definidas en la sección 4.5 al igual que los estimadores.

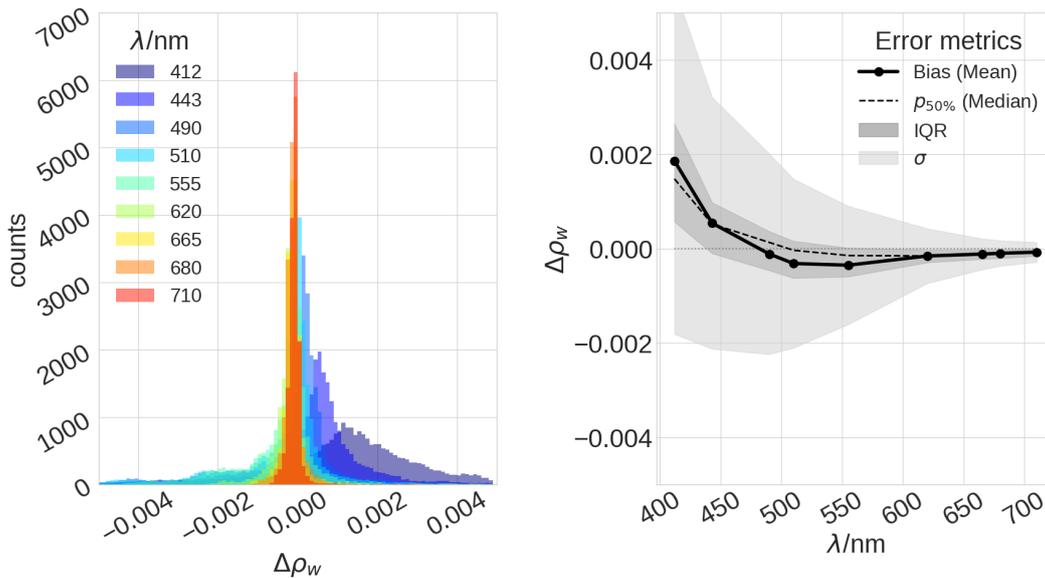


Figura 5.7: Error total ( $\Delta\rho_w = \rho_w^{\text{SMAC}} - \rho_w^{\text{OSOAA}}$ ) del algoritmo SMAC en función de la longitud de onda, en configuración SA y con banderas aplicadas, hasta la banda de  $710 \text{ nm}$ . Observamos, de izquierda a derecha, histograma de  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w$  vs longitud de onda. En el segundo gráfico también se observa: bias, la mediana, el rango intercuartil (IQR) y la desviación estándar. Evaluado sobre las 36288 simulaciones menos píxeles marcados con banderas.

Observamos en la figura 5.8 que a partir de la banda de  $620 \text{ nm}$  ocurre una abrupta crecida del error relativo. Notemos que acercándonos al infrarrojo entramos en la zona donde es válida la suposición de píxel negro para *aguas claras*, tal como fue comentado en el capítulo 3, suposición sobre la cual se fundamenta la corrección atmosférica. Las bandas de estas longitudes de onda presentan una reflectancia extremadamente baja, en este caso de aproximadamente  $10^{-5}$ , con lo cual es esperable que el valor relativo sea siempre alto. Estas longitudes de onda fueron incluidas de manera ilustrativa para poder comprobar la suposición del píxel negro, no obstante, para el resto del trabajo nos limitaremos a las bandas espectrales de la región del azul hasta los  $555 \text{ nm}$ , siguiendo los lineamientos de [12]. Esto se debe a que los requerimientos de error de las misiones satelitales de color del mar se establecen en estas

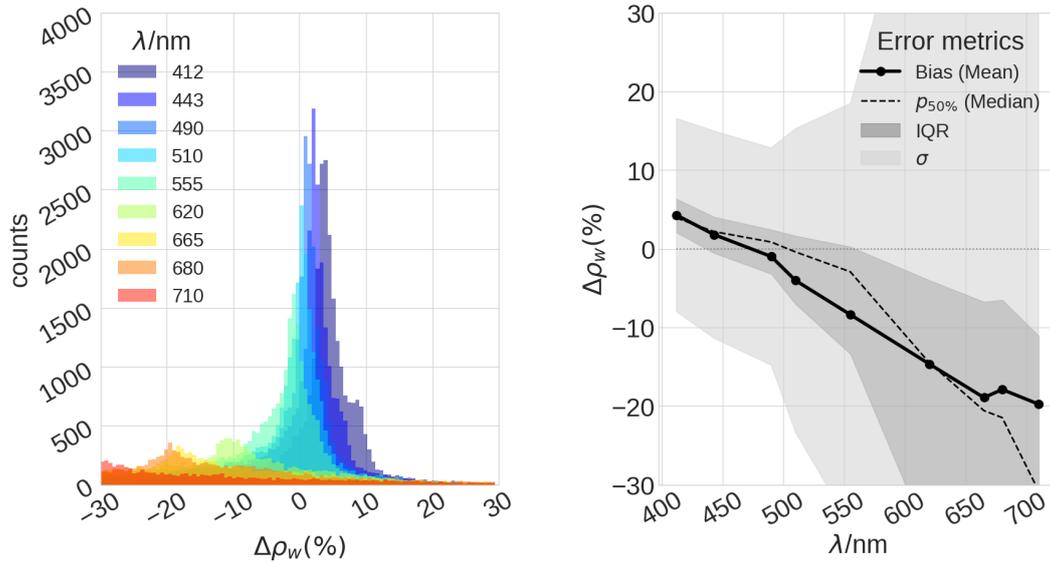


Figura 5.8: Error relativo ( $\Delta\rho_w = (\rho_w^{SMAC} - \rho_w^{OSSOA})/\rho_w^{OSSOA} \times 100$ ) del algoritmo SMAC en función de la longitud de onda, en configuración SA y con banderas aplicadas, hasta la banda de 710 nm. Observamos, de izquierda a derecha, histograma de  $\Delta\rho_w(\%)$  y  $\Delta\rho_w(\%)$  vs longitud de onda. En el segundo gráfico también se observa: bias, la mediana, el rango intercuartil (IQR) y la desviación estándar. Evaluado sobre las 36288 simulaciones menos píxeles marcados con banderas.

primeras bandas, donde los errores de medición son los más altos.

En las figuras 5.9 y 5.10 se observara al igual que en las previamente presentadas el error total  $\Delta\rho_w$  del algoritmo SMAC y el error relativo  $\Delta\rho_w(\%)$  pero para las bandas desde 412 nm hasta 555 nm.

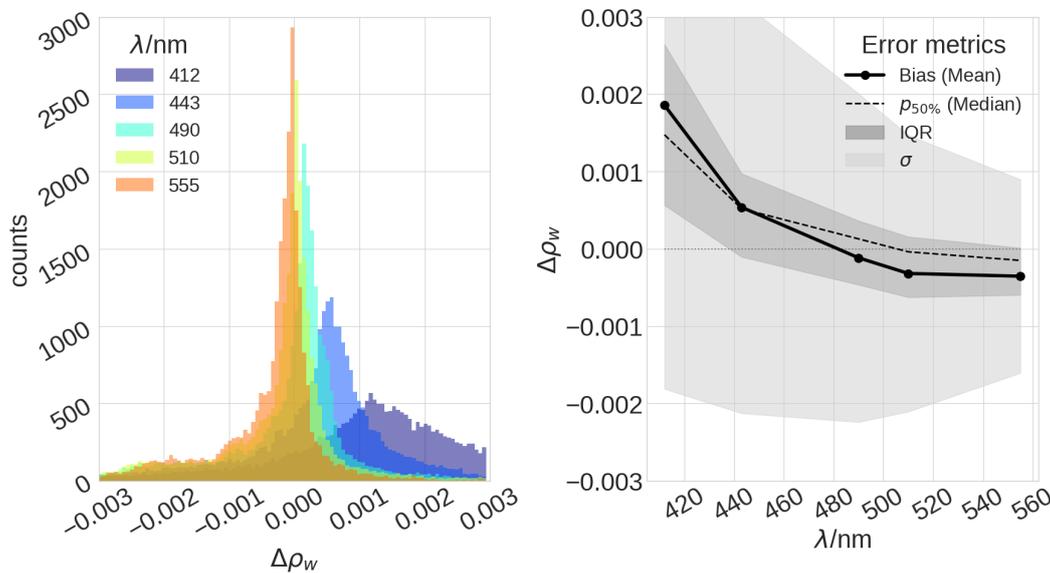


Figura 5.9: Error total ( $\Delta\rho_w = \rho_w^{SMAC} - \rho_w^{OSSOA}$ ) del algoritmo SMAC en función de la longitud de onda, en configuración SA y con banderas aplicadas, hasta banda de 555 nm. Observamos, de izquierda a derecha, histograma de  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w$  vs longitud de onda. En el segundo gráfico también se observa: bias, la mediana, el rango intercuartil (IQR) y la desviación estándar. Evaluado sobre las 36288 simulaciones menos píxeles marcados con banderas.

### 5.2.2. Caso de ángulo variable (MA)

Notar que se presentan en esta sección los resultados o simulaciones con los mismos parámetros de atmósfera y de superficie para cada gráfico presentados en el caso SA (subsección 5.2.1), para que sea posible una comparación.

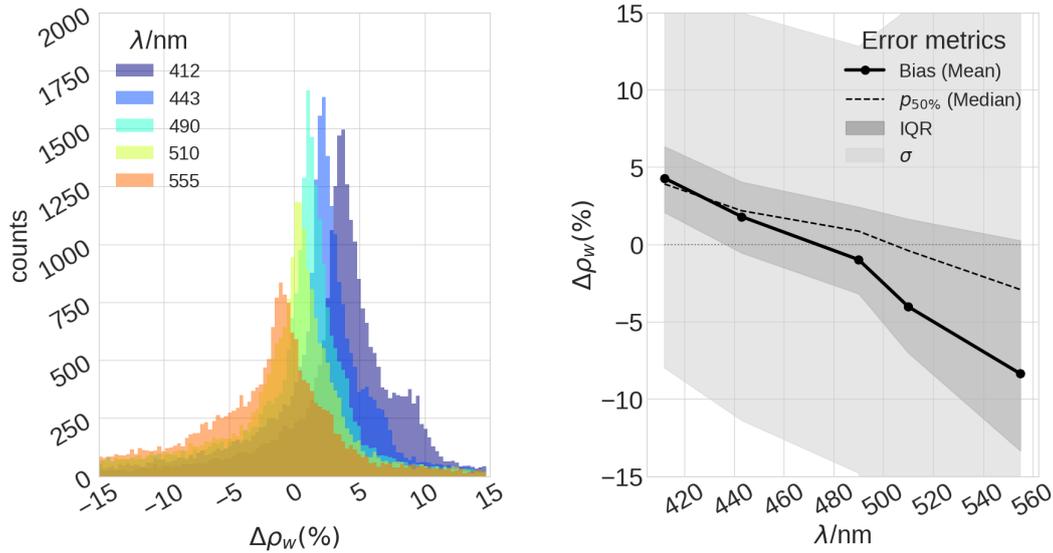


Figura 5.10: Error relativo ( $\Delta\rho_w = (\rho_w^{SMAC} - \rho_w^{OSSOA})/\rho_w^{OSSOA} \times 100$ ) del algoritmo SMAC en función de la longitud de onda, en configuración SA y con banderas aplicadas, hasta banda de 555 nm. Observamos, de izquierda a derecha, histograma de  $\Delta\rho_w(\%)$  y  $\Delta\rho_w(\%)$  vs longitud de onda. En el segundo gráfico también se observa: bias, la mediana, el rango intercuartil (IQR) y la desviación estándar. Evaluado sobre las 36288 simulaciones menos píxeles marcados con banderas.

### Verdad de campo: simulaciones OSOAA

Las simulaciones realizadas de la reflectancia a TOA,  $\rho_{toa}^{OSOAA}$ , y que emerge del agua,  $\rho_w^{OSOAA}$ , para un caso particular con parámetros  $Chl-a = 0.01 \text{ mg/m}^3$ ,  $RH = 75\%$ ,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5 \text{ m/s}$  se observan en la figura 5.11.

Entre el píxel 12 y 23 se puede observar un aumento en el valor de la reflectancia debido a que en el horario y locación en las que se realizaron las simulaciones el satélite recibe reflejo directo del sol (*sunglint*) desde esos píxeles, similar al caso SA. Estos posteriormente serán enmascarados para no ser procesados por el código SMAC, ya que su funcionamiento esta restringido puntos libres de *sunglint*.

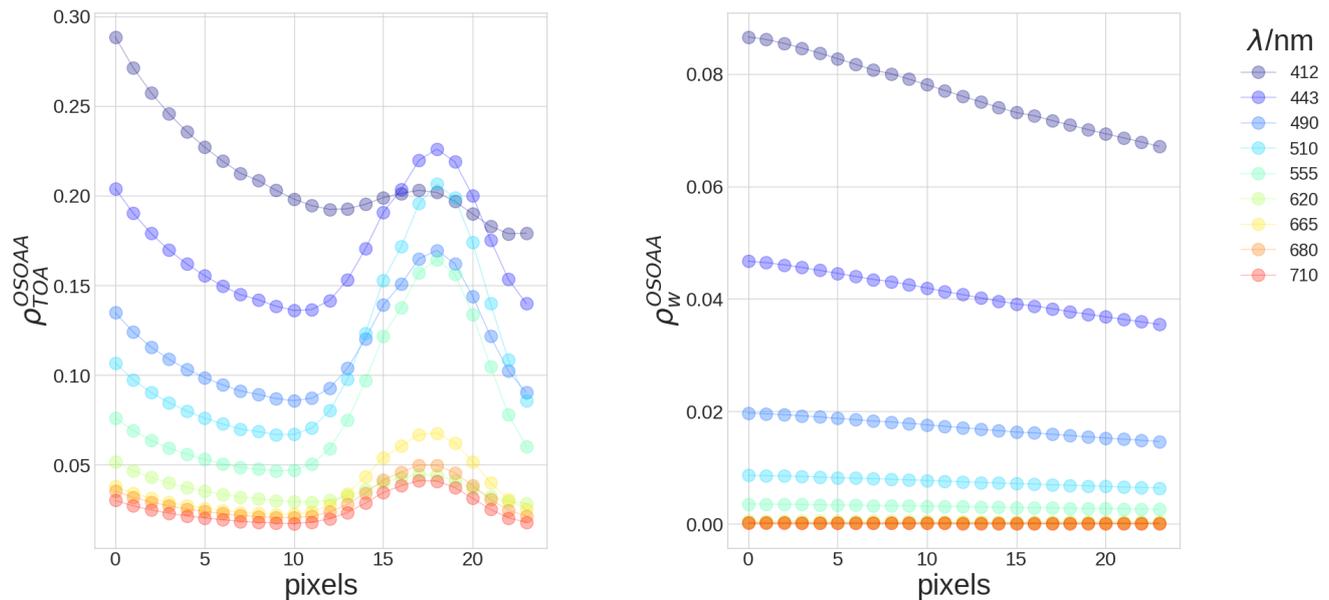


Figura 5.11: Resultados de simulaciones OSSOA en función de los píxeles de la Línea 0 en configuración MA, considerando el modelo marítimo,  $Chl-a = 0.01 \text{ mg/m}^3$ ,  $RH = 75\%$ ,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5 \text{ m/s}$  El primer gráfico, de izquierda a derecha, muestra  $\rho_{TOA}^{OSOAA}$ , seguido de  $\rho_w^{OSOAA}$  en  $\lambda = 412, 443, 490, 510, 555, 620, 665, 680$  y  $710 \text{ nm}$ .

Se pueden observar los mismos comportamientos típicos que notamos en el caso SA, como una reflectancia menor en la superficie del agua (gráfico de la derecha) para longitudes onda cercanas al rojo (compatible con la aproximación de píxel negro) en contraste con las demás bandas y valores mas altos de  $\rho_{toa}$  en comparación con  $\rho_w$  debido a la contribución de la atmósfera.

A diferencia del caso SA podemos notar como en este caso se entrecruzan las líneas en la zona de los píxeles con alto *sun glint*, esto es debido al cambio en la geometría de observación de cada banda.

### Correcciones atmosféricas SMAC

Sobre  $\rho_{toa}$  se aplican los algoritmos de corrección atmosférica para volver a obtener el valor de la reflectancia en la superficie (camino inverso explicado en la sección 4.1). En este proceso se pueden obtener por separado todos los sumandos presentes en la ecuación de transferencia radiativa.(Ecuación (3.2)). Podemos observar todos los términos en la figura 5.12.

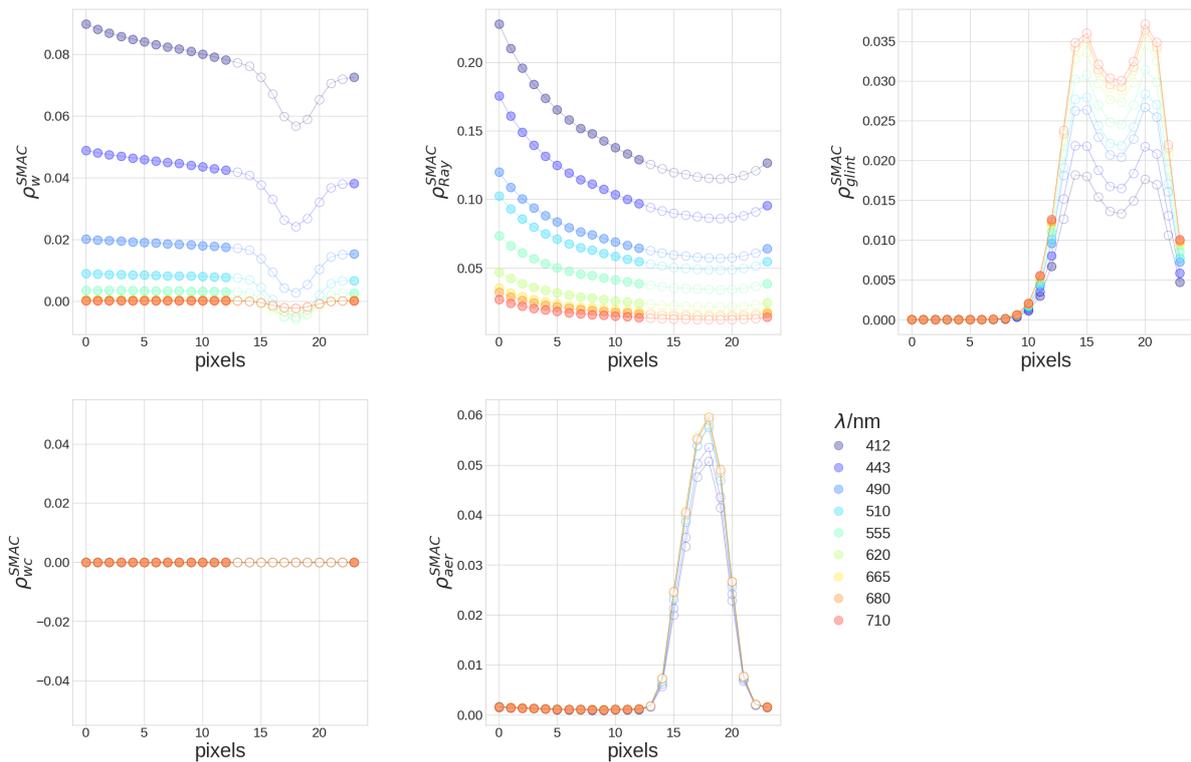


Figura 5.12: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración MA en función de los píxeles de la Línea 0 para las longitudes de onda  $\lambda= 412, 443, 490, 510, 555, 620, 665, 680$  y  $710$  nm. En todos los casos se usó el modelo marítimo,  $Chl-a = 0.01 \text{ mg/m}^3$ ,  $RH = 75\%$ ,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5 \text{ m/s}$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sun glint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

Si observamos la figura 5.12 veremos en el gráfico superior izquierdo la reflectancia que emerge del agua obtenida luego aplicar el SMAC  $\rho_w^{SMAC}$ , la cual debería coincidir con la verdad de campo  $\rho_w^{OSOAA}$  si la corrección fuera perfecta. En el gráfico superior del centro se observa la reflectancia causada por dispersiones de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  (dispersión con moléculas) y a la derecha la reflectancia debida al *sun glint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ , para la cual notamos valores que van desde 0.01 hasta 0.035 entre el píxel 12 y el 24. En la parte inferior a la izquierda, se observa la reffectancia causada por la espuma de mar  $\rho_{wc}^{SMAC}$ , que en este caso donde el parámetro viento es  $5 \text{ m/s}$  es practicamente nula y a la derecha se grafica la reflectancia causada por los aerosoles presentes en la atmósfera  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

En todas las imágenes los pares ordenados blancos corresponden a aquellos píxeles enmascarados por alto valor de reflexión solar especular y no se tendrán en cuenta para ningún análisis.

Otra manera de observar la variación de las componentes de la corrección atmosférica para distintos parámetros ambientales, es graficando en función de la longitud de onda para ciertos píxeles, como se ve

en las figuras 5.13, 5.4 y 5.5.

Se exhiben, para contrastar, los parámetros clorofila: 0.01, 1 [ $mg/m^3$ ] y viento: 5 y 10 [ $m/s$ ] con espesor óptico de aerosol: 0.1 y humedad relativa: 75 %.

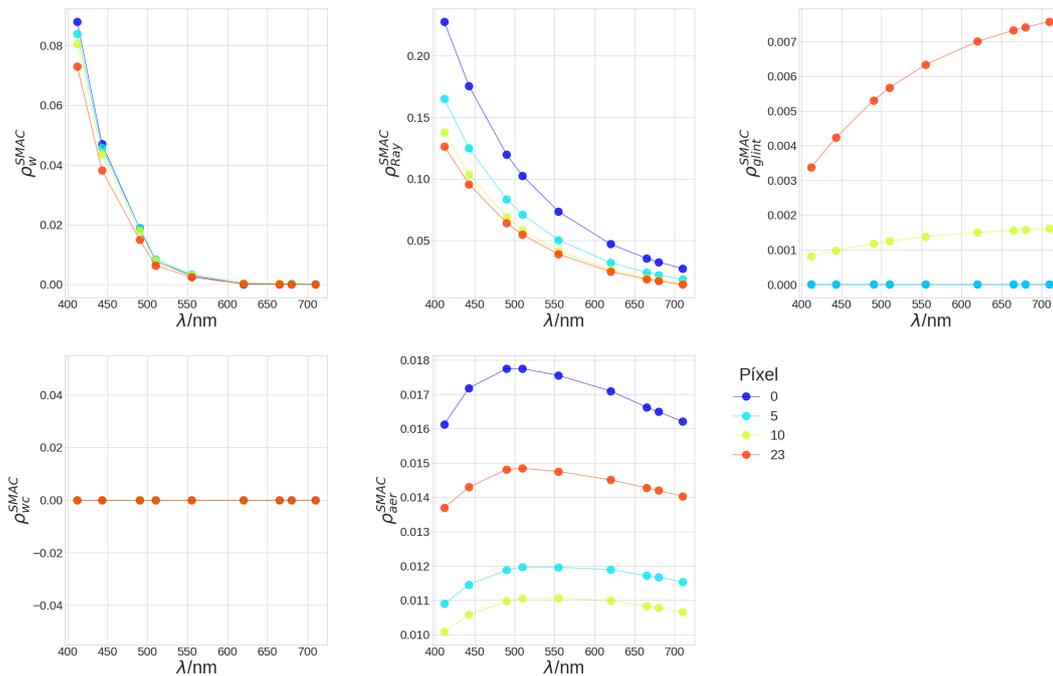


Figura 5.13: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración MA en función de la longitud de onda para cuatro píxeles de la línea 0. En todos los casos se usó el modelo marítimo,  $Chl-a = 0.01 \text{ mg/m}^3$ ,  $W_s = 5 \text{ m/s}$ ,  $RH = 75\%$  y  $\tau_{aer} = 0.1$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sun glint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se grafican las mismas magnitudes descritas para la figura 5.12 y con la misma disposición en la figura. Si comparamos entre las figuras 5.13 y 5.14 podemos notar, en la última, un corte en el decrecimiento de la  $\rho_w^{SMAC}$  en la banda de 490 nm correspondiente al verde. Esto ocurre en la curva correspondiente al valor de clorofila-a más alta, la cual absorbe gran parte de la irradiancia que llega al agua, disminuyendo así  $\rho_w^{SMAC}$  para todas las longitudes de onda excepto la de 490 nm que es la que sigue irradiando de igual manera debido al característico color verde de la clorofila-a. Se puede notar en las 3 figuras el aumento de  $\rho_{glint}^{SMAC}$  cuando se observan los píxeles cercanos al extremo este del swath (ancho de barrido) de la Línea 0, siendo estos el píxel 23 y 10. Finalmente, comparando entre las figuras 5.14 y 5.15 podemos observar como en la primera  $\rho_{wc}^{SMAC}$  es nulo mientras que en la segunda  $\rho_{wc}^{SMAC}$  toma valores no triviales, denotando la relación intrínseca de  $\rho_{wc}^{SMAC}$  con la velocidad del viento.

### Comparación $\rho_w$ entre OSSOA y SMAC

La cantidad  $\rho_w$  es la variable a estudiar, si la corrección atmosférica fuera perfecta no habría diferencia entre la calculada mediante SMAC y la reflectancia *real* de OSOAA. Por lo que se busca minimizar las diferencias estadísticas entre ambos modelos. Para evaluar cuánto difieren entre sí se calcula el valor del error total  $\Delta\rho_w$  y error relativo  $\Delta\rho_w(\%)$  definido en la sección 4.5. En la figura 5.16 se muestran los resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración SA y las simulaciones OSOAA en función de los píxeles de la Línea 0.

A partir de lo observado en la figura 5.16 podemos notar que el algoritmo SMAC sobre estima sistemáticamente  $\rho_w$ . También se puede observar los valores bajos de  $\rho_w$  para los píxeles de las bandas cercanas al infrarrojo en comparación a las demás bandas, aquellos considerados píxeles negros como mencionamos anteriormente, dando lugar a gran error porcentual que veremos mas claramente en las siguientes figuras.

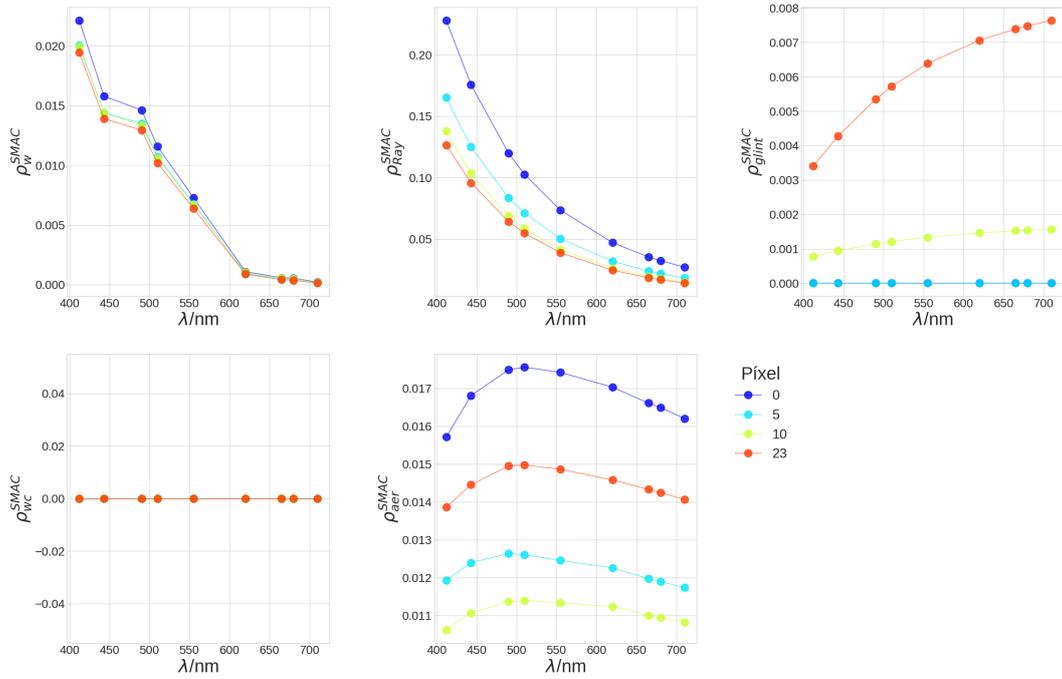


Figura 5.14: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración MA en función de la longitud de onda para cuatro píxeles de la línea 0. En todos los casos se usó el modelo marítimo,  $Chl-a = 1 \text{ mg/m}^3$ ,  $W_s = 5 \text{ m/s}$ ,  $RH = 75 \%$  y  $\tau_{aer} = 0.1$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sunglint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

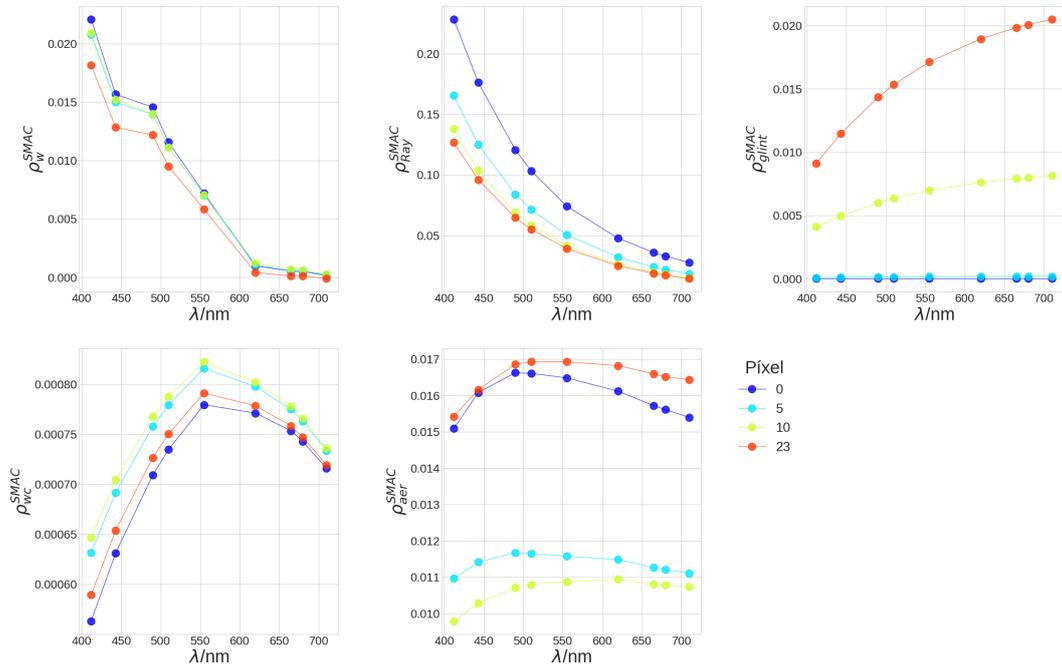


Figura 5.15: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración MA en función de la longitud de onda para cuatro píxeles de la línea 0. En todos los casos se usó el modelo marítimo,  $Chl-a = 1 \text{ mg/m}^3$ ,  $W_s = 10 \text{ m/s}$ ,  $RH = 75 \%$  y  $\tau_{aer} = 0.1$ . La fila superior muestra, de izquierda a derecha, la reflectancia que emerge del agua  $\rho_w^{SMAC}$ , el término de Rayleigh  $\rho_{Ray}^{SMAC}$  y el término de *sunglint*  $\rho_{glint}^{SMAC}$ . Abajo, de izquierda a derecha, se muestra el término de espuma  $\rho_{wc}^{SMAC}$  y el de aerosoles  $\rho_{aer}^{SMAC}$ .

Se estudiará el error cometido, teniendo en cuenta la evaluación de todas las combinaciones de condiciones posibles, incluyendo todas las líneas simuladas, siendo un total de 36288 simulaciones a las cuales

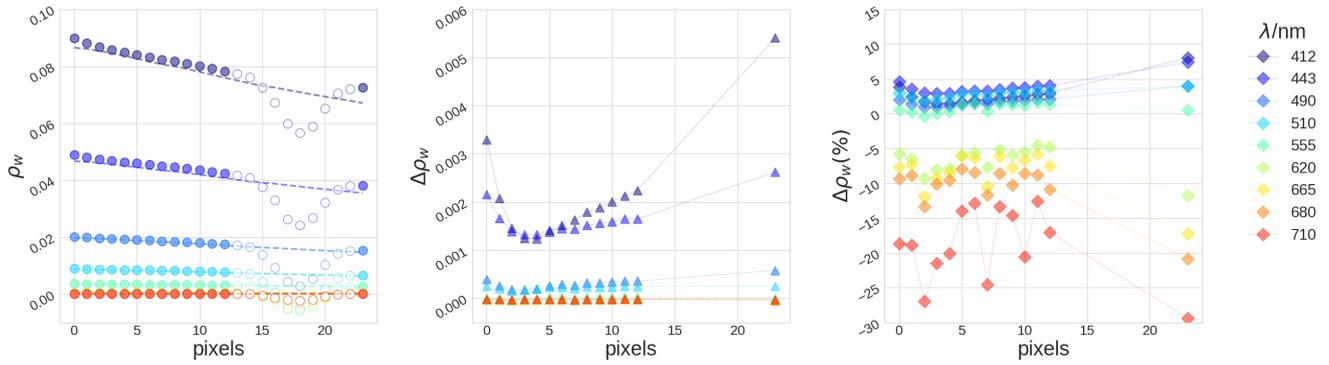


Figura 5.16: Resultados de las correcciones atmosféricas aplicando SMAC para una configuración MA y las simulaciones OSOAA en función de los píxeles de la Línea 0, considerando el modelo marítimo,  $\text{Chl-a} = 0.01 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{RH} = 75\%$ ,  $\tau_{aer} = 0.01$  y  $W_s = 5 \text{ m/s}$ . El primer gráfico, de izquierda a derecha, muestra  $\rho_w^{\text{OSOAA}}$  con líneas discontinuas y  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  con círculos, en  $\lambda = 412, 443, 490, 510, 555, 620, 665, 680$  y  $710 \text{ nm}$ . Los círculos vacíos corresponden a píxeles marcados con reflejo alto que se descartan para el análisis de errores en el post procesamiento. Los resultados correspondientes para  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w(\%)$  se muestran en el segundo y tercer gráfico, respectivamente.

se les restarán los píxeles marcados con banderas. En la figura 5.17 se observa el error total  $\Delta\rho_w$  (derecha) del algoritmo SMAC para las bandas desde  $412 \text{ nm}$  hasta  $555 \text{ nm}$  y su histograma (izquierda). En la figura 5.18 se presenta el valor del error relativo  $\Delta\rho_w(\%)$  (derecha) y su histograma (izquierda). En el gráfico de la derecha se observan también las correspondientes métricas de los estimadores las cuales fueron definidas en la sección 4.5 al igual que los estimadores. Observamos el mismo fenómeno para las bandas cercanas al infrarrojo que en el caso anterior SA. Por lo tanto solo presentaremos los análisis estudiando hasta la banda de  $555 \text{ nm}$ .

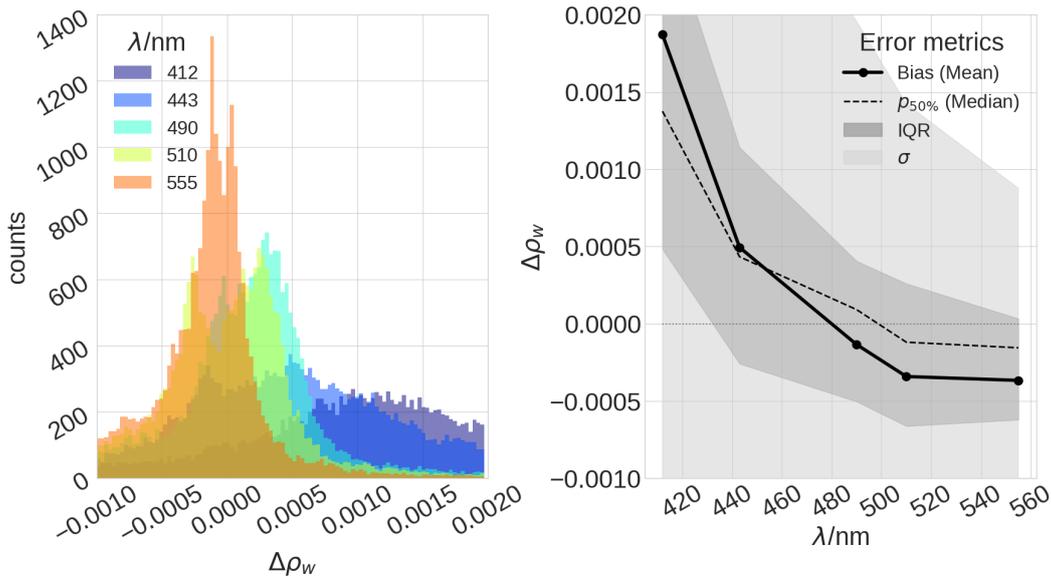


Figura 5.17: Error total ( $\Delta\rho_w = \rho_w^{\text{SMAC}} - \rho_w^{\text{OSOAA}}$ ) del algoritmo SMAC en función de la longitud de onda, en configuración MA y con banderas aplicadas, hasta la banda de  $555 \text{ nm}$ . Observamos, de izquierda a derecha, histograma de  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w$  vs longitud de onda. En el segundo gráfico también se observa: bias, la mediana, el rango intercuartil (IQR) y la desviación estándar. Evaluado sobre las 36288 simulaciones menos píxeles marcados con banderas.

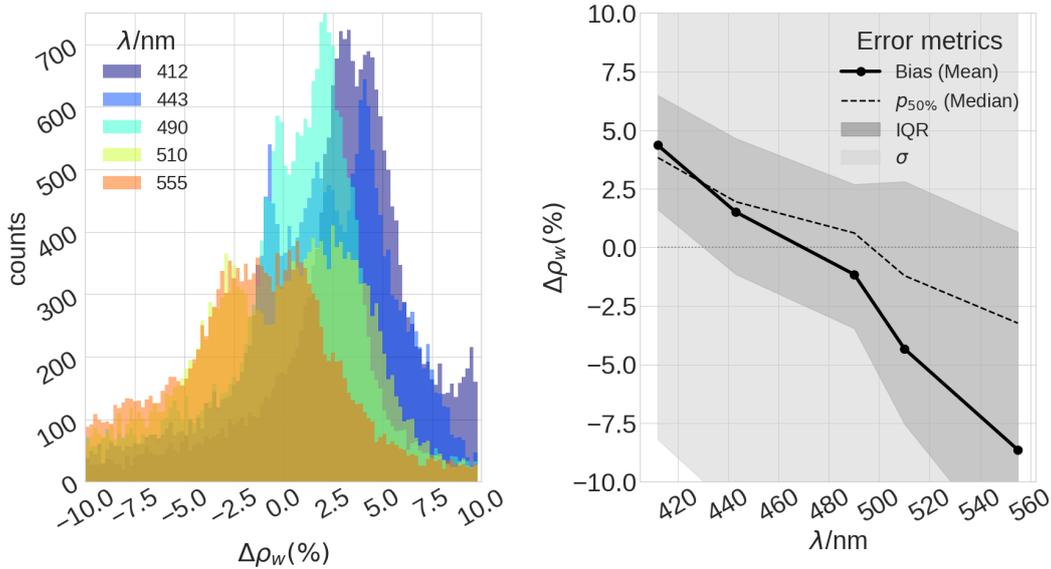


Figura 5.18: Error relativo ( $\Delta\rho_w = (\rho_w^{\text{SMAC}} - \rho_w^{\text{OSSOA}})/\rho_w^{\text{OSSOA}} \times 100$ ) del algoritmo SMAC en función de la longitud de onda, en configuración MA y con banderas aplicadas, hasta la banda de 555 nm. En el segundo gráfico también se observa: bias, la mediana, el rango intercuartil (IQR) y la desviación estándar. Evaluado sobre las 36288 simulaciones menos píxeles marcados con banderas.

### 5.3. Análisis de los resultados obtenidos para cada modelo

Se realizó el mismo estudio previo, exhaustivo en todas las variaciones de parámetros y condiciones, para los demás modelos de aerosoles.

A continuación exhibiremos gráficos en donde se comparan las configuraciones SA y MA y las tablas con los respectivos estadísticos de la variable error  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w(\%)$ .

Se calcularán las siguientes métricas, utilizando la correspondiente función de la librería Numpy de Python.

- N: número de simulaciones con las que se trabajó.
- Bias: es el valor medio del error  $\Delta\rho_w$  cometido por el algoritmo SMAC.
- Mediana: es el valor de la variable que se encuentra en la mitad de la distribución de la misma.
- Desviación estándar ( $\sigma$ ): es la desviación estándar de la variable, que en este caso es  $\Delta\rho_w$ .
- MSE: es el error cuadrático medio. (MSE son las siglas en inglés de *Mean squared error*).
- Rango intercuartil (IQR): es el rango en el cual se encuentra el 50% central de la distribución. Esto es entre el percentil 75 y el 25 de la distribución.

#### Marítimo

Observamos el error medio total Bias( $\Delta\rho_w$ ) y relativo Bias( $\Delta\rho_w(\%)$ ) en la figura 5.19.

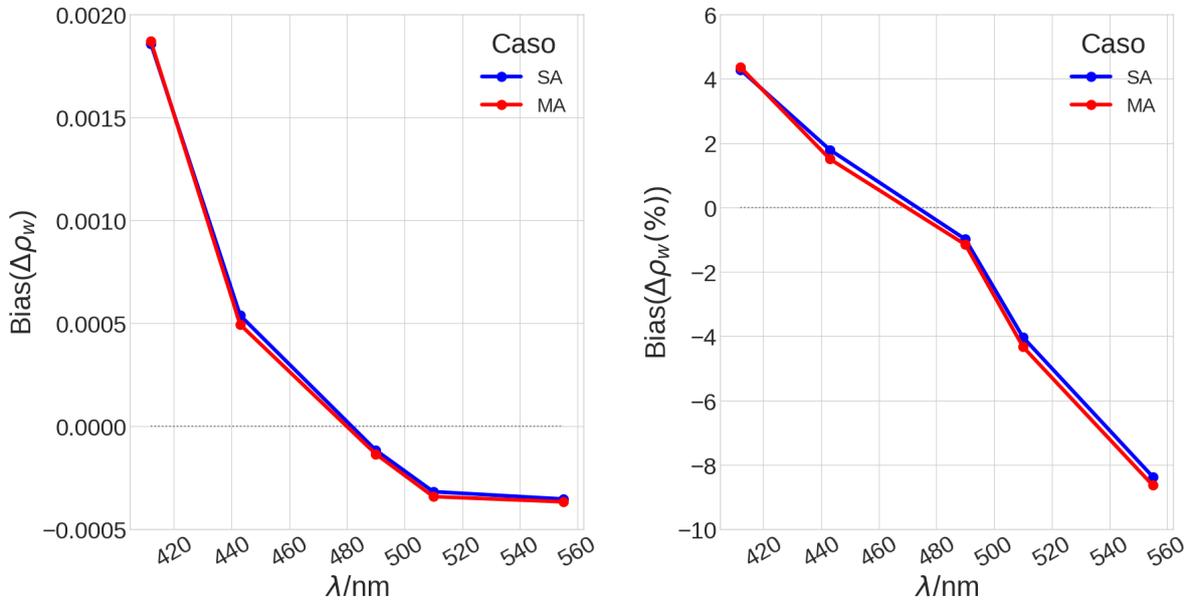


Figura 5.19: Se grafica el bias de las configuraciones SA y MA para todas las simulaciones realizadas, es decir todas las combinaciones posibles de condiciones, con el modelo de aerosoles Marítimo.

	λ [nm]	N	Δρ <sub>w</sub>				Δρ <sub>w</sub> (%)				
			Bias ×10 <sup>-3</sup>	Mediana ×10 <sup>-3</sup>	σ ×10 <sup>-3</sup>	MSE ×10 <sup>-6</sup>	IQR ×10 <sup>-3</sup>	Bias	Mediana	σ	IQR
SA	412	26880	1.9	1.5	3.7	17.0	0.6 ; 2.6	4.3	3.9	12.3	2.1 ; 6.3
	443	26880	0.5	0.5	2.7	7.4	-0.1 ; 1.0	1.8	2.2	13.2	-0.6 ; 4.0
	490	26880	-0.1	0.1	2.1	4.5	-0.5 ; 0.4	-1.0	0.9	13.8	-3.2 ; 2.4
	510	26848	-0.3	0.0	1.8	3.3	-0.6 ; 0.2	-4.0	-0.4	19.3	-7.0 ; 1.6
	555	26275	-0.3	-0.1	1.3	1.7	-0.6 ; 0.0	-8.4	-2.9	26.8	-13.4 ; 0.3
MA	412	26880	1.9	1.4	3.8	18.0	0.5 ; 2.7	4.4	3.8	12.6	1.6 ; 6.5
	443	26880	0.5	0.4	2.6	6.9	-0.3 ; 1.1	1.5	1.9	12.8	-1.1 ; 4.6
	490	26880	-0.1	0.1	2.1	4.4	-0.5 ; 0.4	-1.2	0.6	13.6	-3.5 ; 2.7
	510	26848	-0.3	-0.1	1.8	3.2	-0.7 ; 0.3	-4.3	-1.2	18.9	-7.5 ; 2.8
	555	26275	-0.4	-0.2	1.2	1.7	-0.6 ; 0.0	-8.6	-3.2	26.4	-13.5 ; 0.7

Cuadro 5.1: Estadísticos de Δρ<sub>w</sub> y Δρ<sub>w</sub>(%): número de simulaciones (N), Bias, mediana, desviación estándar y rango intercuartil para el modelo de aerosoles marítimo, tanto en configuración SA como MA, hasta la banda de 555 nm. Se tienen en cuenta todas las simulaciones menos las marcadas con banderas.

Observando el cuadro 5.1 y la figura 5.19 notamos:

- De manera cuantitativa podemos ver que:
  - El bias del error total Δρ<sub>w</sub> no presenta diferencias apreciables entre casos MA y SA. Para ambas configuraciones decrece con λ empezando en 1.9×10<sup>-3</sup> para la banda 412 nm y alcanzando -0.3×10<sup>-3</sup> para la 555 nm. El Bias, en el caso relativo de ambas configuraciones, se corre a valores mas bajos a partir de la banda de 443 nm variando dentro del intervalo [-8.6 , 4.3] siendo menor el valor absoluto en MA para las bandas 412 nm y 443 nm .
  - La mediana se corre a valores mas bajos en el caso de configuración MA.
  - La desviación estándar es menor para la configuración MA a partir de la banda de 443 nm, siendo mas notorio en el caso relativo.
  - El rango intercuartil es sistemáticamente mayor para el caso MA, tanto en el caso de diferencia total como en el relativo.
- De manera cualitativa podemos ver que:
  - Se aprecia una sobre estimación de ρ<sub>w</sub><sup>SMAC</sup> para la banda de 443 nm en ambas configuraciones.
  - A pesar de que la diferencia en el Bias es indistinguible entre MA y SA y que la mediana indica una mayor sobre estimación de ρ<sub>w</sub><sup>SMAC</sup> ( dados los valores positivos de la mediana) para

el caso SA, el IQR nos dice lo contrario, y lo esperado, dado el mayor rango para todas las bandas en MA. Un mayor rango intercuartil da lugar a una sub estimación o sobre estimación mayor de  $\rho_w^{SMAC}$ .

### Costero

Observamos el error medio total  $Bias(\Delta\rho_w)$  y relativo  $Bias(\Delta\rho_w(\%))$  en la figura 5.20.

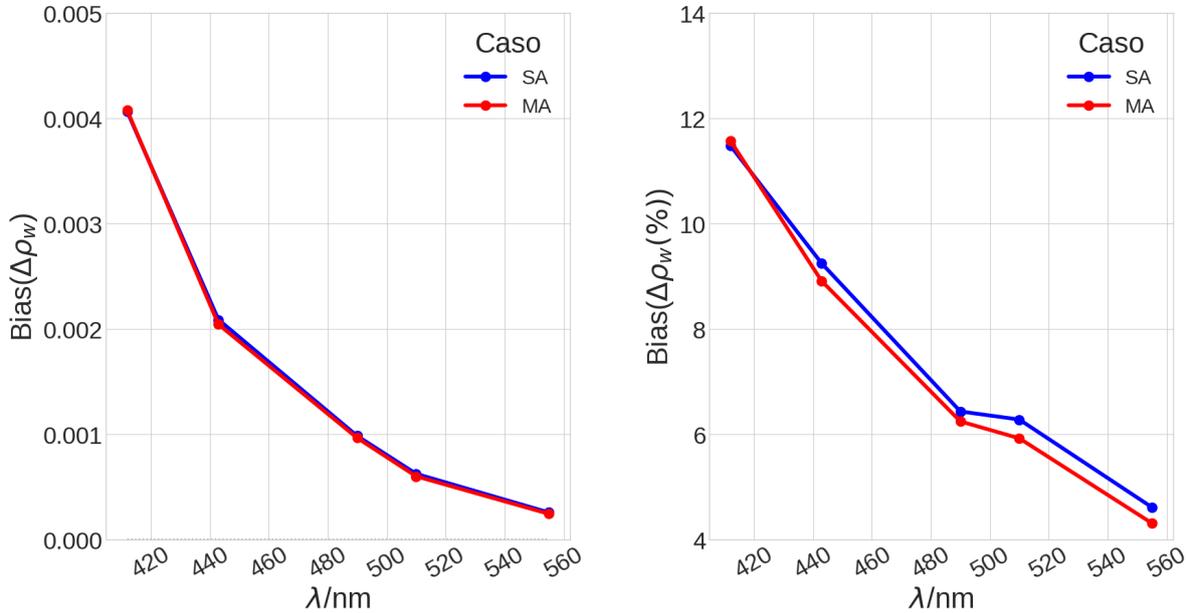


Figura 5.20: Se grafica el bias de las configuraciones SA y MA para todas las simulaciones realizadas, es decir todas las combinaciones posibles de condiciones, con el modelo de aerosoles Costero.

$\lambda$ [nm]	N	$\Delta\rho_w$					$\Delta\rho_w(\%)$				
		Bias $\times 10^{-3}$	Mediana $\times 10^{-3}$	$\sigma$ $\times 10^{-3}$	MSE $\times 10^{-6}$	IQR $\times 10^{-3}$	Bias	Mediana	$\sigma$	IQR	
SA	412	26880	4.1	2.6	8.3	85.0	1.5 ; 4.6	11.5	7.1	27.0	4.3 ; 11.6
	443	26878	2.1	1.2	5.3	32.0	0.6 ; 2.4	9.2	5.3	25.5	2.5 ; 10.6
	490	26880	1.0	0.6	3.0	10.0	0.2 ; 1.2	6.4	3.8	19.7	1.2 ; 8.4
	510	26873	0.6	0.3	2.4	6.1	0.0 ; 0.8	6.3	3.4	25.2	0.2 ; 8.8
	555	26820	0.3	0.1	1.3	1.8	-0.1 ; 0.4	4.6	1.9	28.5	-1.8 ; 7.7
MA	412	26880	4.1	2.6	8.3	86.0	1.4 ; 4.7	11.6	7.0	27.3	4.1 ; 12.2
	443	26878	2.0	1.3	5.2	31.0	0.4 ; 2.5	8.9	5.6	24.7	2.0 ; 10.6
	490	26880	1.0	0.6	3.0	10.0	0.1 ; 1.2	6.2	4.0	19.3	1.1 ; 8.2
	510	26873	0.6	0.3	2.4	6.0	-0.1 ; 0.8	5.9	3.7	24.2	-1.0 ; 9.0
	555	26820	0.2	0.1	1.3	1.7	-0.1 ; 0.4	4.3	2.0	27.9	-2.5 ; 7.8

Cuadro 5.2: Estadísticos de  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w(\%)$ : número de simulaciones (N), Bias, mediana, desviación estándar y rango intercuartil para el modelo de aerosoles costero, tanto en configuración SA como MA, hasta la banda de 555 nm. Se tienen en cuenta todas las simulaciones menos las marcadas con banderas.

Observando el cuadro 5.2 y la figura 5.20 notamos:

- De manera cuantitativa podemos ver que:
  - El Bias, en el caso relativo de configuración MA, se corre a valores mas bajos a partir de la banda de 443 nm. Lo mismo ocurre en la diferencia total pero con menos notoriedad.
  - La mediana se corre a valores mas alto en el caso relativo de la configuración MA.
  - La desviación estándar es menor para la configuración MA en el caso relativo a partir de la banda de 443 nm, no hay variación sustancial en la diferencia total.
  - El rango intercuartil es sistemáticamente mayor para el caso MA tanto en el caso de diferencia total como en el relativo.

- De manera cualitativa podemos ver que:
  - Un mayor rango intercuartil, como se da en la configuración MA, da lugar a una sub estimación o sobre estimación mayor de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$ .

### Troposférico

Observamos el error medio total  $\text{Bias}(\Delta\rho_w)$  y relativo  $\text{Bias}(\Delta\rho_w(\%))$  en la figura 5.21.

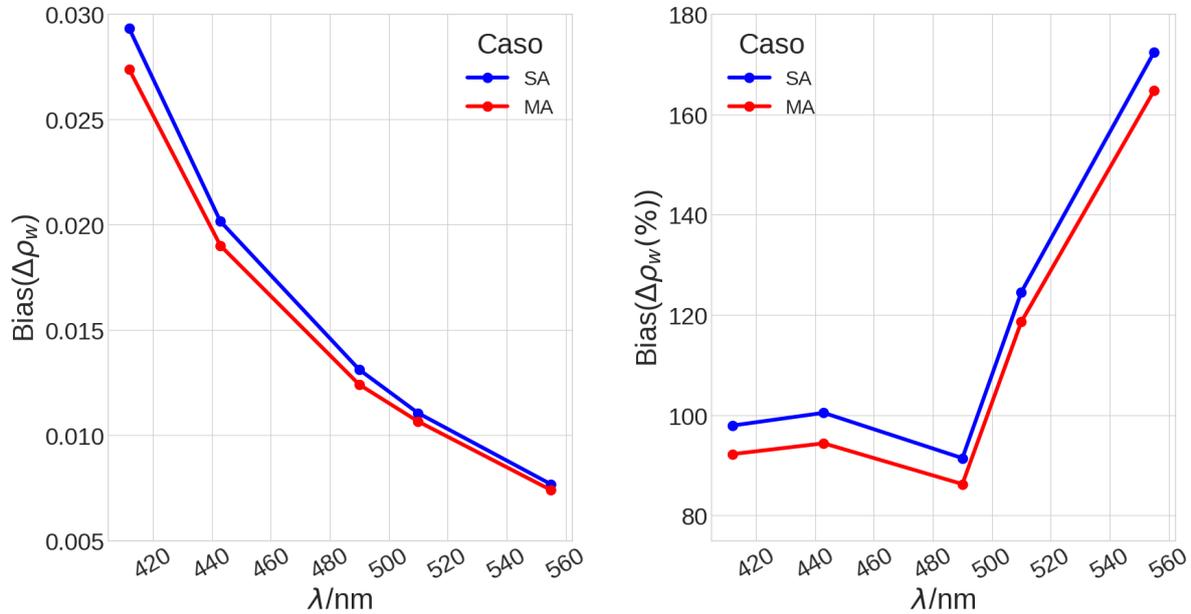


Figura 5.21: Se grafica el bias de las configuraciones SA y MA para todas las simulaciones realizadas, es decir todas las combinaciones posibles de condiciones, con el modelo de aerosoles Troposférico.

	$\lambda$ [nm]	N	$\Delta\rho_w$					$\Delta\rho_w(\%)$			
			Bias $\times 10^{-3}$	Mediana $\times 10^{-3}$	$\sigma$ $\times 10^{-3}$	MSE $\times 10^{-6}$	IQR $\times 10^{-3}$	Bias	Mediana	$\sigma$	IQR
SA	412	26693	29.0	4.8	72.0	6100.0	1.8 ; 21.0	97.9	12.4	272.9	4.3 ; 62.0
	443	26599	20.0	2.8	48.0	2700.0	0.6 ; 16.0	100.5	13.1	260.1	2.3 ; 76.5
	490	26521	13.0	1.7	29.0	1000.0	0.1 ; 12.0	91.4	11.9	210.1	0.5 ; 81.0
	510	26205	11.0	1.5	23.0	670.0	-0.1 ; 11.0	124.6	15.1	278.2	-1.0 ; 114.7
	555	25751	7.7	1.1	15.0	290.0	-0.1 ; 8.0	172.4	21.6	377.0	-2.9 ; 161.3
MA	412	27223	27.0	5.1	66.0	5100.0	1.9 ; 20.0	92.2	13.1	253.9	4.7 ; 60.8
	443	25873	19.0	2.8	46.0	2400.0	0.6 ; 15.0	94.4	12.4	246.5	2.3 ; 69.8
	490	25989	12.0	1.7	28.0	920.0	0.1 ; 11.0	86.3	11.5	199.7	0.5 ; 74.9
	510	25571	11.0	1.5	23.0	640.0	-0.1 ; 10.0	118.6	15.7	266.7	-1.7 ; 107.5
	555	25314	7.4	1.1	15.0	280.0	-0.2 ; 7.8	164.7	21.3	363.8	-3.5 ; 149.7

Cuadro 5.3: Estadísticos de  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w(\%)$ : número de simulaciones (N), Bias, mediana, desviación estándar y rango intercuartil para el modelo de aerosoles troposférico, tanto en configuración SA como MA, hasta la banda de 555 nm. Se tienen en cuenta todas las simulaciones menos las marcadas con banderas.

Observando el cuadro 5.3 y la figura 5.21 notamos:

- De manera cuantitativa podemos ver que:
  - El Bias, en la configuración MA, se corre a valores mas bajos en todas las bandas.
  - La mediana, en el caso relativo de la configuración MA, alterna entre valores mas altos o bajos en comparación al caso SA .
  - La desviación estándar es menor para la configuración MA.
  - El rango intercuartil es sistemáticamente menor para el caso MA tanto en el caso de diferencia total como en el relativo.

- De manera cualitativa podemos ver que:
  - En comparación con los modelos anteriores, este cuenta con un Bias notablemente mayor y correspondiente a una sobre estimación de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$ , también se puede inferir de los valores de MSE y del IQR.
  - En este modelo de aerosol el algoritmo SMAC sobre estima  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  para casi la totalidad de las simulaciones.

### Urbano

Observamos el error medio total  $\text{Bias}(\Delta\rho_w)$  y relativo  $\text{Bias}(\Delta\rho_w(\%))$  en la figura 5.22.

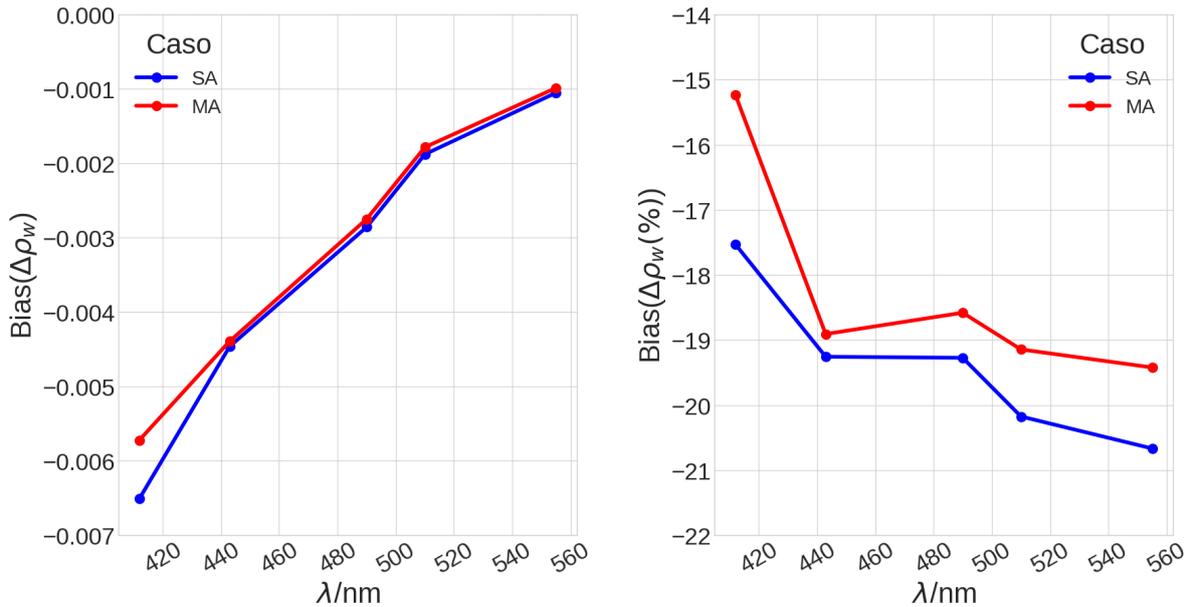


Figura 5.22: Se grafica el bias de las configuraciones SA y MA para todas las simulaciones realizadas, es decir todas las combinaciones posibles de condiciones, con el modelo de aerosoles Urbano.

	$\lambda$ [nm]	N	$\Delta\rho_w$					$\Delta\rho_w(\%)$			
			Bias $\times 10^{-3}$	Mediana $\times 10^{-3}$	$\sigma$ $\times 10^{-3}$	MSE $\times 10^{-6}$	IQR $\times 10^{-3}$	Bias	Mediana	$\sigma$	IQR
SA	412	23989	-6.5	-3.5	12.0	180.0	-10.0 ; 0.0	-17.5	-9.5	30.0	-31.1 ; 0.0
	443	23900	-4.5	-2.6	6.8	66.0	-7.1 ; -0.3	-19.3	-11.1	27.4	-32.1 ; -1.3
	490	24621	-2.9	-1.7	3.9	23.0	-4.6 ; -0.3	-19.3	-11.2	25.9	-31.0 ; -2.2
	510	23912	-1.9	-1.2	2.5	9.8	-3.0 ; -0.3	-20.2	-12.9	26.2	-32.3 ; -3.3
	555	23458	-1.1	-0.7	1.5	3.2	-1.7 ; -0.2	-20.7	-13.9	26.4	-33.6 ; -4.5
MA	412	24446	-5.7	-3.1	12.0	190.0	-9.6 ; 0.2	-15.2	-8.5	32.6	-29.2 ; 0.6
	443	23039	-4.4	-2.6	6.9	67.0	-7.1 ; -0.4	-18.9	-11.3	28.2	-32.2 ; -1.5
	490	23942	-2.7	-1.6	3.9	23.0	-4.6 ; -0.3	-18.6	-11.0	26.0	-30.5 ; -2.2
	510	22964	-1.8	-1.1	2.5	9.4	-3.0 ; -0.2	-19.1	-12.2	26.1	-31.7 ; -2.6
	555	22977	-1.0	-0.6	1.5	3.2	-1.6 ; -0.2	-19.4	-12.8	27.2	-32.7 ; -3.4

Cuadro 5.4: Estadísticos de  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w(\%)$ : número de simulaciones (N), Bias, mediana, desviación estándar y rango intercuartil para el modelo de aerosoles urbano, tanto en configuración SA como MA, hasta la banda de 555 nm. Se tienen en cuenta todas las simulaciones menos las marcadas con banderas.

Observando el cuadro 5.4 y la figura 5.22 notamos:

- De manera cuantitativa podemos ver que:
  - El Bias, en la configuración MA, se corre a valores mas bajos en todas las bandas.
  - La mediana es sistemáticamente menor para el caso MA tanto en el caso de diferencia total como en el relativo.
  - La desviación estándar es mayor para la configuración MA, en el caso relativo.

- El rango intercuartil es menor para el caso MA tanto en el caso de diferencia total como en el relativo para la mayoría de las bandas aunque en cantidades no notorias.
- De manera cualitativa podemos ver que:
  - En comparación con los modelos marítimo y costero, este cuenta con un Bias notablemente mayor y correspondiente a una sub estimación ( a diferencia del troposférico el cual sobre estima) de  $\rho_w^{SMAC}$ , también se puede inferir de los valores de MSE y del IQR.
  - En este modelo de aerosol el algoritmo SMAC sub estima  $\rho_w^{SMAC}$  para casi la totalidad de las simulaciones.

**Caso global: todos los modelos**

Por ultimo se estudia el caso global en donde se tienen en cuenta todas las simulaciones para todos los modelos. Observamos el error medio total  $Bias(\Delta\rho_w)$  y relativo  $Bias(\Delta\rho_w(\%))$  en la figura 5.23.

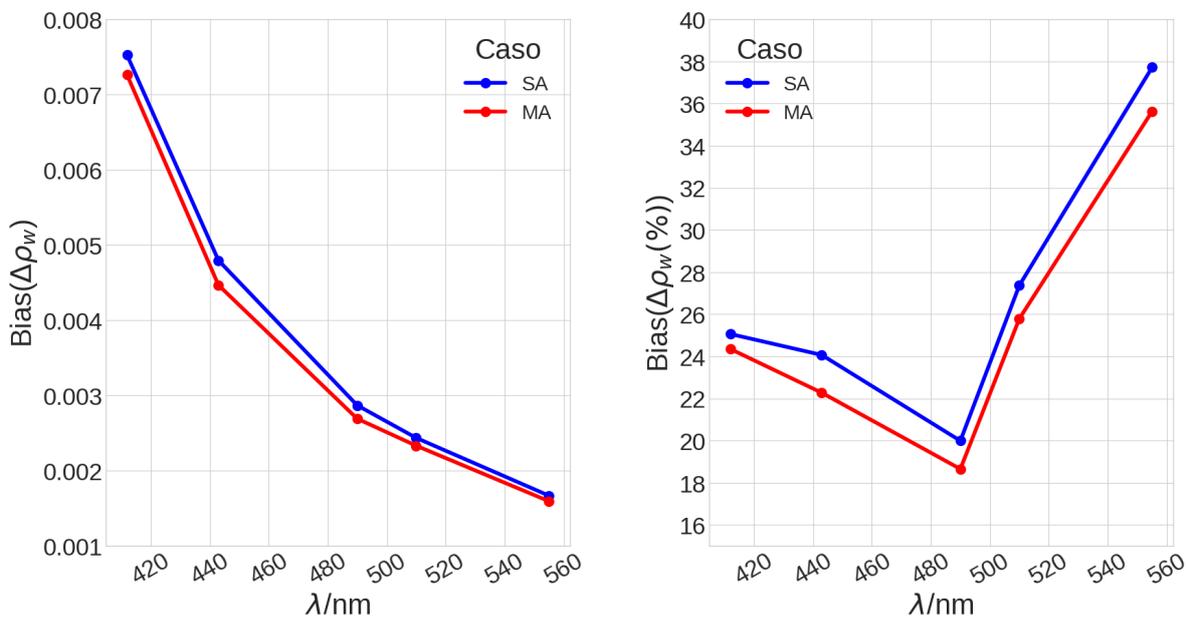


Figura 5.23: Se grafica el bias de las configuraciones SA y MA para todas las simulaciones realizadas, es decir todas las combinaciones posibles de condiciones, para todos los modelos.

λ [nm]	N	Δρ <sub>w</sub>					Δρ <sub>w</sub> (%)			
		Bias ×10 <sup>-3</sup>	Mediana ×10 <sup>-3</sup>	σ ×10 <sup>-3</sup>	MSE ×10 <sup>-6</sup>	IQR ×10 <sup>-3</sup>	Bias	Mediana	σ	IQR
SA	412	7.5	1.8	39.0	1.6	-0.1 ; 4.2	25.1	4.6	146.3	-0.5 ; 10.3
	443	4.8	0.7	26.0	0.7	-0.6 ; 2.1	24.1	2.8	140.6	-3.1 ; 9.1
	490	2.9	0.2	16.0	0.3	-0.8 ; 1.1	20.0	1.4	115.2	-5.3 ; 7.3
	510	2.4	0.0	13.0	0.2	-0.7 ; 0.8	27.4	0.4	152.4	-8.1 ; 8.2
	555	1.7	-0.1	8.5	0.1	-0.5 ; 0.4	37.7	-1.2	206.2	-11.5 ; 7.9
MA	412	7.3	1.7	37.0	1.4	-0.1 ; 4.4	24.3	4.7	137.2	-0.3 ; 11.2
	443	4.5	0.6	25.0	0.6	-0.6 ; 2.2	22.3	2.9	132.5	-3.1 ; 8.9
	490	2.7	0.2	15.0	0.2	-0.8 ; 1.1	18.7	1.5	109.1	-5.3 ; 7.2
	510	2.3	0.0	13.0	0.2	-0.7 ; 0.8	25.8	0.4	145.4	-8.4 ; 8.5
	555	1.6	-0.1	8.3	0.1	-0.5 ; 0.4	35.6	-1.2	198.0	-11.7 ; 8.1

Cuadro 5.5: Estadísticos de  $\Delta\rho_w$  y  $\Delta\rho_w(\%)$ : número de simulaciones (N), Bias, mediana, desviación estándar y rango intercuartil para las simulaciones de todos los modelos de aerosoles, tanto en configuración SA como MA, hasta la banda de 555 nm. Se tienen en cuenta todas las simulaciones menos las marcadas con banderas.

Observando el cuadro 5.5 y la figura 5.23 notamos:

- De manera cuantitativa podemos ver que:

- El Bias de  $\Delta\rho_w$ , en la configuración MA, se corre sistemáticamente a valores mas bajos en comparación con el caso SA. Se puede observar el mismo comportamiento en el error relativo  $\Delta\rho_w(\%)$ . Para ambas configuraciones  $\Delta\rho_w$  decrece con  $\lambda$  empezando en  $7.5\times 10^{-3}$  para la banda 412 nm y alcanzando  $1.6\times 10^{-3}$  para la 555 nm.
  - La mediana toma valores mayores para el caso MA, para la diferencia relativa. No hay variación sustancial en el caso de diferencia total.
  - La desviación estándar es sistemáticamente menor para la configuración MA.
  - El rango intercuartil es mayor en el caso MA para la diferencia total en las primeras 3 bandas. En el caso relativo observamos lo mismo para las bandas de 412 y 555 nm mientras que el rango es menor para el caso MA para las bandas de 443 y 490 nm.
- De manera cualitativa podemos ver que:
- El caso global da un Bias mayor, en comparación con los modelos marítimo y costero, correspondiente a una sobre estimación de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$ . A diferencia de los modelos urbano y troposférico, en donde se podía apreciar el mayor error cometido también en el MSE, aquí no se observan valores altos de MSE debido a una *compensación* de las sobre o sub estimaciones de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  entre uno y otro modelo.

### 5.3.1. Comparaciones entre modelos

Compararemos la diferencia total obtenida entre el caso de ángulo simple SA y ángulo variable MA para cada modelo siendo esta misma la cantidad que tenemos como objetivo estudiar.

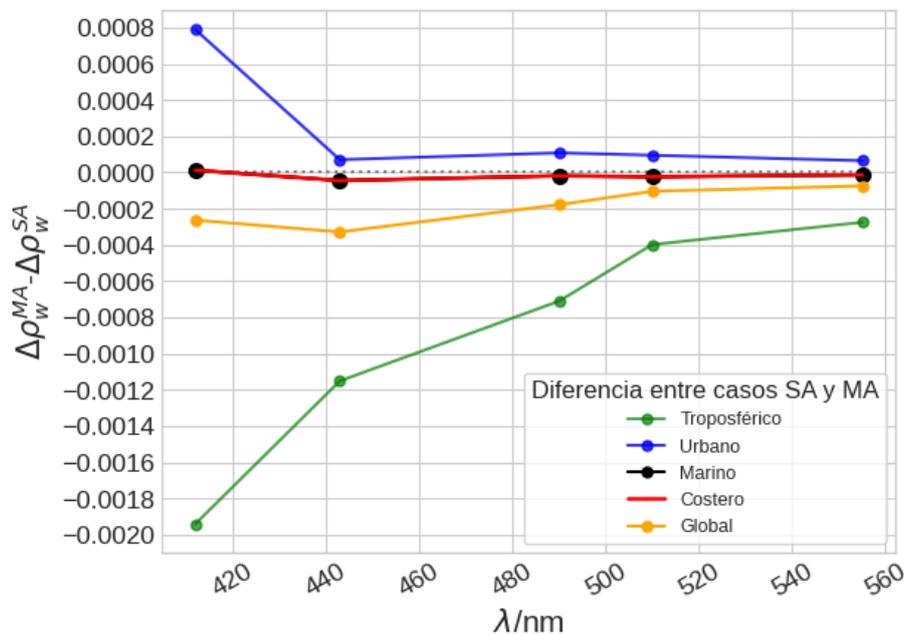


Figura 5.24: Diferencia total entre el caso SA y MA de todos los modelos.

Podemos notar que el caso del modelo troposférico es el que presenta la mayor diferencia total.



## Capítulo 6

# Discusiones y trabajos futuros

En este trabajo se exploró la confiabilidad del algoritmo estándar de correcciones atmosféricas en la obtención de la reflectancia saliente del agua en el visible para el caso en donde los ángulos de observación para cada longitud de onda son diferentes. Particularmente, analizamos la configuración multi-angular de la cámara VIS-NIR que estará a bordo del satélite argentino de color del mar SABIA-Mar. Para ello se utilizó el algoritmo de correcciones atmosféricas del Equipo de Ciencia de la Misión SABIA-Mar, llamado SMAC. Este algoritmo fue desarrollado modificando el algoritmo estándar basado en el trabajo de Gordon y Wang [9, 5], ampliamente testado en diferentes misiones del color de mar cuyas bandas espectrales tienen el mismo ángulo de visión.

El desempeño del algoritmo se evaluó analizando una amplia variedad de condiciones atmosféricas, de superficie y de composición del agua, utilizando el programa OSOAA [22] para generar la *verdad de campo*. Si bien las condiciones estuvieron restringidas al caso de aguas oceánicas abiertas (aguas caso 1), amplía el estudio realizado recientemente en [12], al incorporar modelos de aerosoles no estudiados en dicho trabajo.

Para todos los casos se calculó el error cometido por el SMAC en la condición de visión multi-angular comparándolo con la situación análoga pero para el caso de observación estándar que considera un único ángulo de visión para todas las longitudes de ondas. Siguiendo los lineamientos establecidos en [12], se calculó el error  $\Delta\rho_w$  y el error porcentual  $\Delta\rho_w(\%)$  como la diferencia entre el valor obtenido luego de la corrección atmosférica con SMAC y la verdad de campo (simulada con OSOAA). Además, tanto en el caso SA como MA se calcularon las métricas: el error cuadrático medio, la media o bias, la desviación estándar, la mediana y el rango intercuartil. El bias, analizado en conjunto con su desviación estándar como medida de dispersión, es un estimador que permite inferir si hay tendencias (sobre o sub-estimación) en el desempeño del algoritmo, lo cual no se puede apreciar en el error cuadrático medio. Por otro lado, la mediana junto con la medida de dispersión del rango inter-cuartil, puede resultar útil para describir el comportamiento del error en un caso como este en donde los  $\Delta\rho_w$  no tienen una distribución simétrica.

El análisis del caso marítimo arrojó resultados similares a los que se observaron en [12] para el conjunto de modelos marítimo mas costero. Esto se debe a que ambos modelos son muy parecidos variando el último solo en proporciones de los aerosoles constituyentes. Resumiendo:

- El bias del error total  $\Delta\rho_w$  no presenta diferencias apreciables entre casos MA y SA. Para ambas configuraciones decrece con  $\lambda$  empezando en  $1.9 \times 10^{-3}$  para la banda 412 nm y alcanzando  $-0.3 \times 10^{-3}$  para la 555 nm. El Bias, en el caso relativo de ambas configuraciones, se corre a valores mas bajos a partir de la banda de 443 nm variando dentro del intervalo  $[-8.6, 4.3]$  siendo menor el valor absoluto en MA para las bandas 412 nm y 443 nm .
- La mediana se corre a valores mas bajos en el caso de configuración MA.
- La desviación estándar es menor para la configuración MA a partir de la banda de 443 nm, siendo mas notorio en el caso relativo.
- El rango intercuartil es sistemáticamente mayor para el caso MA, tanto en el caso de diferencia total como en el relativo.
- Se aprecia una sobre estimación notable de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  para la banda de 443 nm en ambas configuraciones.

- A pesar de que la diferencia en el Bias es indistinguible entre MA y SA y que la mediana indica una mayor sobre estimación de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  ( dados los valores positivos de la mediana) para el caso SA, el IQR nos dice lo contrario, y lo esperado, dado el mayor rango para todas las bandas en MA. Un mayor rango intercuartil da lugar a una sub estimación o sobre estimación mayor de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$ .

Cuando se incorporan los modelos troposférico y urbano se observan aumento de todos los estadísticos de error. Esto es esperable ya que el modelo estándar de correcciones atmosféricas funciona mejor para aguas abiertas, que no se corresponden con estos modelos de aerosoles. Resumiendo:

- El Bias de  $\Delta\rho_w$ , en la configuración MA, se corre sistemáticamente a valores mas bajos en comparación con el caso SA. Se puede observar el mismo comportamiento en el error relativo  $\Delta\rho_w$  (%). Para ambas configuraciones  $\Delta\rho_w$  decrece con  $\lambda$  empezando en  $7.5 \times 10^{-3}$  para la banda 412 nm y alcanzando  $1.6 \times 10^{-3}$  para la 555 nm.
- La mediana toma valores mayores para el caso MA, para la diferencia relativa. No hay variación sustancial en el caso de diferencia total.
- La desviación estándar es sistemáticamente menor para la configuración MA.
- El rango intercuartil es mayor en el caso MA para la diferencia total en las primeras 3 bandas. En el caso relativo observamos lo mismo para las bandas de 412 y 555 nm mientras que el rango es menor para el caso MA para las bandas de 443 y 490 nm.
- El caso global da un Bias notablemente mayor, en comparación con los modelos marítimo y costero, correspondiente a una sobre estimación de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$ . A diferencia de los modelos urbano y troposférico, en donde se podía apreciar el mayor error cometido también en el MSE, aquí no se observan valores altos de MSE debido a una *compensación* de las sobre o sub estimaciones de  $\rho_w^{\text{SMAC}}$  entre uno y otro modelo.

Los resultados obtenidos son prometedores y sugieren que es factible obtener valores de reflectancia saliente del agua con la configuración multi-angular con errores que son comparables con la configuración SA. Sin embargo, resulta necesario seguir investigando e implementar mejoras al algoritmo SMAC actualmente en desarrollo. Especialmente, se puede observar una pérdida de precisión en las longitudes de onda del azul (banda de 412nm) y en modelos de aerosoles no compatibles con las aguas abiertas. Es sabido que la suposición del píxel negro que utiliza el algoritmo estándar [9] y en el cual se basa la mayoría de los productos operativos de color del mar deja de valer en aguas costeras. Este tipo de aguas son conocidas como aguas caso 2 o aguas complejas, con un mayor contenido de sedimentos que hacen que la respuesta espectral en la región del NIR no sea despreciable. Como solución en este caso se han propuesto usar bandas con longitudes de onda mayores, en la región del SWIR, pero no siempre son exitosas. Es por ello que se se pueden plantear los siguientes trabajos futuros:

- Ampliar el análisis a aguas complejas, como lo son las aguas costeras, para determinar si siguen siendo válidos los resultados obtenidos.
- Implementar el uso de las bandas SWIR en el esquema de correcciones atmosféricas estándar y analizar su desempeño.
- Analizar nuevos algoritmos no estándares basados en el uso de toda la información espectral disponible, y no solo la información de un par de bandas con baja respuesta en el NIR o el SWIR. Es decir, adoptar otras estrategias independientes de la suposición del píxel negro, como lo es el algoritmo POLYMER [26].

Finalmente, las correcciones atmosféricas son un paso clave e indispensable en la generación de productos operativos en una misión de color del mar. Por ello, el desarrollo de los algoritmos en etapas tempranas del desarrollo de la misión es clave para el mejor aprovechamiento de los datos satelitales desde las primeras órbitas luego del lanzamiento. Testear dichos algoritmos con datos simulados, en ausencia de los datos del satélite previo al lanzamiento, es crucial debido a que mejora y agiliza los tiempos de calibración y validación de las cámaras y los productos una vez que el satélite se encuentra en órbita. Es por ello que este trabajo representa un aporte concreto y significativo a la Misión SABIA-Mar que actualmente está en desarrollo por la CONAE.

# Bibliografía

- [1] C. Tauro, M. Compagnucci, M. Rabolli, *Material teórico del curso Introducción a la Teleobservación, Diplomatura en geomática aplicada*,(2018).
- [2] A. Dogliotti, *Estimación de la biomasa fitoplanctónica mediante el sensoramiento remoto del color del mar y datos de campo en la plataforma continental patagónica*,(2007).
- [3] C. Tauro, M. Labanda, El Ojo del Condor, Número 11, ISSN 2362-5821. Web link
- [4] . Zibordi, G., Donlon, C. and Parr, A. (eds.), *Optical Radiometry for Ocean Climate Measurements*, Experimental Methods in the Physical Sciences, Volume 47. Academic Press, 2014.
- [5] C.D. Mobley, J. Werdell, B. Franz, Z. Ahmad, and S. Bailey, *Atmospheric correction for satellite ocean color radiometry*, TECHNICAL MEMORANDUM NASA/TM-2016-217551, National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, 2016
- [6] C.Tauro, E. Floreani, F. Nemiña, *ATBD: Normalized Water Leaving Radiance  $[L_w]_N$* , SB-040401-NT-00400, Release B (2023).
- [7] C. B. Tauro, R. E. Floreani, F. E. Godoy and G. Valvassori, *Advances in the algorithms for the generation of science products of the SABIA-Mar mission*, 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), San Juan, Argentina, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9940002.
- [8] H.R. Gordon and K.J. Voss. *MODIS normalized water-leaving radiance (ATBD MOD18, v4)*. Ocean Color web page, (Mod 18):1–96, 1999.
- [9] H. R. Gordon and M. Wang, *Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS : a preliminary algorithm*, Appl. Opt., 33(3):443–452, 1994.
- [10] IOCCG (2012). Mission Requirements for Future Ocean-Colour Sensors. McClain, C. R. and Meister, G. (eds.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 13, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- [11] Sitio web de SABIA-Mar. URL <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/sabia-mar>.
- [12] C.Tauro, M.Labanda, E. Floreani, G. Valvassori, M. Ávila, F. Godoy, J. Tan, R. Frouin, *Atmospheric correction approach for SABIA-MAR ocean color mission* ,(2023).
- [13] E. Floreani and F. Nemiña. *Simplified atmospheric correction for sabia-mar*. Conae document, CO-NAE, 2023.
- [14] H. R. Gordon and M. Wang. *Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors. 1: The rayleigh-scattering component*. Appl. Opt., 31(21):4247–4260, Jul 1992. doi: 10.1364/AO.31.004247. URL <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-31-21-4247>.
- [15] B. A. Bodhaine, N. B. Wood, E. G. Dutton, and J. R. Slusser. *On Rayleigh optical depth calculations*. J. Atmos. Oceanic Technol., 16:1854–1861, 1999.
- [16] M. Wang. *A refinement for the Rayleigh radiance computation with variation of the atmospheric pressure*. Internat. J. Remote Sensing, 26:56515653, 2005.

- [17] C. Cox and W. Munk, The measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glint, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 838-850. 1954a.
- [18] C. Cox and W. Munk, Statistics of the sea surface derived from sun glitter, *J. Mar. Res.*, 13, 198-227. 1954b.
- [19] R. Frouin, M. Schwindling, and P.Y. Deschamps. *Spectral reflectance of sea foam in the visible and near-infrared: In situ measurements and remote sensing implications*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C6):14361–14371, 1996.
- [20] C. Tauro, F. Nemiña, M. Labanda, *VIS-NIR and NIR-SWIR Bands Layout Report*, SB-040305-RP-00100 (2018).
- [21] C. Tauro, E. Floreani, F. Nemiña, M. Labanda, *Report for VIS-NIR bands layout and pointing modifications*, SB-040305-RP-00300 (2020).
- [22] M. Chami, B. Lafrance, B. Fougnie, J. Chowdhary, T. Harmel, and F. Waquet, *Osoaa: a vector radiative transfer model of coupled atmosphere-ocean system for a rough sea surface application to the estimates of the directional variations of the water leaving reflectance to better process multi-angular satellite sensors data over the ocean*, *Opt. Express*, vol. 23, pp. 27829–27852, Oct 2015.
- [23] A. Morel, D. Antoine, and B. Gentili. *Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function*. *Appl. Optics*, 41:6289–6306, 2002.
- [24] CNES, “Radiative transfer code – OSOAA”, <https://github.com/CNES/RadiativeTransferCode-OSOAA>, 2015.
- [25] E. P. Shettle and R. W. Fenn, *Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties*, 1979
- [26] Steinmetz, François and Deschamps, Pierre-Yves and Ramon, Didier, *Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS*, *Optics express*, vol. 19, nro. 10, pp 9783–9800, 2011.
- [27] Ferrante A., *Implementación de técnicas de inteligencia artificial para el tratamiento de imágenes satelitales de color del mar*, Trabajo Especial de la Licenciatura en Ciencias de la Computación, FaMAF (UNC), 31 de Mayo de 2022.